



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH PARNÍHO PLYNOVÉHO KOTLE

DESIGN OF STEAM GAS BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kuriál

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jakub Kuriál**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh parního plynového kotle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte parní plynový kotel 100 t/h, 10,5 MPa, 520 °C s přirozenou cirkulací parovodní směsi ve výparníku. Kotel navrhněte s vysokou účinností s ohledem na rosný bod spalin.

Cíle diplomové práce:

- provedení stechiometrických výpočtů
- stanovení účinnosti kotle
- stanovení teploty rosného bodu spalin
- provedení tepelného výpočtu kotle včetně rozměrového návrhu kotle
- zhotovení výkresové dokumentace

Seznam doporučené literatury:

BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992.

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

VILIMEC, Ladislav. Stavba kotlů II. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1716-3.

VILIMEC, Ladislav. Stavba kotlů I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0076-4.

BASU, Pabir., Cen KEFA, Louis JESTIN: Boilers and Burners. Springer 1999, ISBN 0-387-98703-7

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Zadání pro Diplomovou práci

Návrh parního plynového kotle

Navrhněte parní plynový kotel 100 t/h, 10,5 MPa(a), 520 °C s přirozenou cirkulací parovodní směsi ve výparníku. Kotel navrhněte s vysokou účinností s ohledem na rosný bod spalin.

Palivo:

Zemní plyn

Výhřevnost

35,99 MJ/Nm³

Složení

CH₄

97,43 %obj.

C₂H₆

1,02 %obj.

C₃H₈

0,32 %obj.

C₄H₁₀

0,11 %obj.

C₅H₁₂

0,03 %obj.

CO₂

0,29 %obj.

N₂

0,80 %obj.

Teplota napájecí vody

145 °C

Cíle diplomové práce:

Provést stechiometrické výpočty.

Provést tepelný výpočet kotle včetně rozměrového návrhu kotle.

Stanovit účinnost kotle.

Stanovit teplotu rosného bodu spalin.

Konzultant: Ing. Michal Pecháček

Oponent: Ing. Robert Bursa

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje návrhu parního kotle na spalování zemního plynu. Návrh obsahuje stechiometrický výpočet, výpočet účinnosti kotle, tepelné výpočty a stanovení geometrických parametrů kotle a teplosměnných ploch. Správnost výpočtu je ověřena tepelnou bilancí kotle.

Klíčová slova

Parní kotel, zemní plyn, tepelný výpočet, pára, spaliny

ABSTRACT

This thesis deals with a design of a steam boiler combusting natural gas. It consists of stoichiometric calculation, determination of boiler efficiency, thermal calculations and determining geometric parameters of the boiler and its heat transfer surfaces. The results are verified by the heat balance of the boiler.

Key words

Steam boiler, natural gas, thermal calculation, steam, flue gas

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KURIÁL, Jakub. *Návrh parního plynového kotle* [online]. Brno, 2020, 89 s. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121600>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh parního plynového kotle** vypracoval samostatně s použitím citované literatury a odborných konzultací.

20.6.2020

Datum

Jakub Kuriál

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Michalovi Pecháčkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc. za vedení diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	16
2	Stechiometrické výpočty	17
	2.1 Objemy složek spalín při stechiometrickém spalování $\alpha=1$	18
	2.2 Objemy složek spalín s přebytkem vzduchu $\alpha=1,05$	21
	2.3 Entalpie spalín s přebytkem vzduchu $\alpha=1,05$ a užitím recirkulace spalín	22
3	Rosný bod	24
4	Ztráty kotle	25
5	Výkon kotle	26
6	Výpočet ohniště	27
	6.1 Návrh spalovací komory	27
	6.2 Tepelný výpočet ohniště	27
7	Návrh teplosměnných ploch	31
	7.1 Návrh teplosměnných ploch ze strany pracovního média	31
	7.2 Tepelný výkon na straně pracovního média	32
8	Mříž	33
	8.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín	34
	8.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín	35
	8.3 Výsledný součinitel přestupu tepla a tepelný výkon	35
	8.4 Teplo odebrané mříží	36
9	Obratová komora	37
	9.1 Membránová stěna	37
	9.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí	37
	9.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín	38
	9.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín pro membránové stěny	39
10	Přehřívák PIII	40
	10.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín	41
	10.2 Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín	42
	10.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry	43
	10.4 Membránová stěna	45
	10.5 Tepelná balance	46
11	Přehřívák PII	47
	11.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín	48
	11.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín	49
	11.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	50
	11.4 Membránová stěna	52
	11.5 Tepelná balance	53
12	Přehřívák PI	54
	12.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín	55
	12.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín	56
	12.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	57
	12.4 Membránová stěna	59
	12.5 Tepelná balance	61

13	Ekonomizér II	62
13.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	63
13.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....	64
13.3	Membránová stěna	66
13.4	Tepelná bilance	68
14	Ekonomizér I.....	69
14.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	70
14.2	Redukovaný součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	71
14.3	Tepelná bilance.....	73
15	Ohřívak vzduchu (LUVO).....	74
15.1	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	75
15.2	Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu.....	77
15.3	Tepelná bilance	79
16	Kontrola výkonu kotle.....	80
17	Pilový diagram	81
	Závěr	82
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	83
	Seznam použitých zdrojů	86
	Seznam obrázků.....	87
	Seznam tabulek.....	88
	Seznam příloh.....	89

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá provedením tepelného výpočtu a rozměrového návrhu kotle. Jedná se o parní kotel na spalování zemního plynu, jehož parametry jsou dány parním výkonem 100 t/h, výstupní teplotou páry 520 °C a tlakem 10,5 MPa. Teplota napájecí vody je 145 °C.

Kotel je řešen jako vysokotlaký, bubnový, o třech tazích. První dva tahy jsou tvořeny membránovými stěnami výparníku, třetí tah je nechlazený plechový. V prvním tahu se nachází spalovací komora. Spalování probíhá pomocí šesti čelních hořáků uspořádaných ve dvou řadách nad sebou. Po spálení paliva míří vzniklé spaliny přes mříž do druhého tahu kotle, kde jsou umístěny tři svazky přehříváků a část ekonomizéru, který byl, z důvodu maximálního využití místa ve druhém tahu, rozdělen. Teplota páry u přehříváků je regulována dvěma vstříky napájecí vody. Všechny svazky v druhém tahu jsou tvořeny pomocí hladkých trubek. Na základě odborné konzultace nejsou svazky uchyceny pomocí závěsných trubek, ale jsou zavěšeny na háčky, umístěné na membránové stěně. V posledním tahu kotle spaliny proudí přes žebrovanou část ekonomizéru a ohřívák vzduchu, poté odcházejí do komína. Kotel je uvažován jako podepřený (samonosný), tudíž postavený na vlastní konstrukci.

Při spalování zemního plynu vzniká oproti pevným a kapalným palivům mnohem méně emisí. Jedná se především o oxid uhelnatý a uhlovodíky, ale také o oxidy dusíku (NO_x). Také prach a oxid siřičitý bývá obsažen pouze v zanedbatelném množství [4].

Výpočet postupuje podle doporučené literatury [1,2]. Tvar kotle a rozdělení tlaků v teplosměnných plochách byly zvoleny na základě odborné konzultace. Dále byla zavedena recirkulace spalin o velikosti 20 %, která je využita k potlačení tvorby NO_x . Z odborné literatury [1] byly určeny fyzikální vlastnosti spalin a vlastnosti pracovního media byly odečteny z tabulek [3].

2 Stechiometrické výpočty

Pro stechiometrické výpočty byl použit zadaný zemní plyn, jehož složení je uvedeno v tabulce 2.1. Dále byly zohledněny místní fyzikální vlastnosti vzduchu.

Tabulka 2.1 Složení zemního plynu

prvky	%obj.
CH ₄	97,43
C ₂ H ₆	1,02
C ₃ H ₈	0,32
C ₄ H ₁₀	0,11
C ₅ H ₁₂	0,03
N ₂	0,8
CO ₂	0,29
Σ	100

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1Nm³ plynu

$$O_{O_2} = 0,5 \cdot o_{H_2} + 0,5 \cdot o_{CO} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot o_{CmHn} - o_{O_2} \quad (2.1)$$

$$O_{O_2} = 0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot 0,9743 + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 0,0102 + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,0003 + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,0011 + \\ + \left(5 + \frac{12}{4} \right) \cdot 0,0003 - 0 \\ O_{O_2} = 2,010 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1 mN³ plynu

$$O_{V_{S_{\min}}} = \frac{O_{O_2}}{0,21} = \frac{2,010}{0,21} = 9,571 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.2)$$

Tabulka 2.2 fyzikální vlastnosti vzduchu

relativní vlhkost vzduchu	φ	70	%
tlak syté páry	p''	3169,7	Pa
tlak okolí	p _o	101325	Pa

Podíl vodní páry na 1 m³ suchého vzduchu

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} = 1 + \frac{70}{100} \cdot \frac{3169,7}{101325 - \frac{70}{100} \cdot 3169,7} = 1,022 \quad (2.3)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu na spalení 1 m³ plynu

$$O_{V_{\min}} = \chi \cdot O_{VS_{\min}} = 1,022 \cdot 9,571 = 9,785 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.4)$$

Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu

$$O_{H_2O}^V = O_{V_{\min}} - O_{VS_{\min}} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VS_{\min}} = (1,022 - 1) \cdot 9,571 = 0,214 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.5)$$

2.1 Objemy složek spalín při stechiometrickém spalování $\alpha=1$

Objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = o_{CO_2} + 0,994 \cdot \left[o_{CO} + \sum m \cdot o_{CmHn} \right] + 0,0003 \cdot O_{VS_{\min}} \quad (2.6)$$

$$O_{CO_2} = \frac{0,29}{100} + 0,994 \cdot \left(0 + 1 \cdot \frac{97,43}{100} + 2 \cdot \frac{1,02}{100} + 3 \cdot \frac{0,32}{100} + 4 \cdot \frac{0,11}{100} + 5 \cdot \frac{0,03}{100} \right) + 0,0003 \cdot 9,571$$

$$O_{CO_2} = 1,016 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Objem dusíku

$$O_{N_2} = o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VS_{\min}} = \frac{0,80}{100} + 0,7805 \cdot 9,571 = 7,478 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.7)$$

Objem argonu

$$O_{Ar} = o_{Ar} + 0,0092 \cdot O_{VS_{\min}} = 0 + 0,0092 \cdot 9,571 = 0,0881 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.8)$$

Výsledný objem suchých spalín

$$O_{SS_{\min}} = O_{CO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 1,016 + 7,4779 + 0,0881 = 8,582 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.9)$$

Objem vodní páry ve spalínách po stechiometrickém spalení

$$O_{H_2O}^S = O_{H_2O} + O_{H_2} + \sum \frac{n}{2} \cdot O_{CmHn} + O_{H_2O}^V \quad (2.10)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{4}{2} \cdot \frac{97,43}{100} + \frac{6}{2} \cdot \frac{1,02}{100} + \frac{8}{2} \cdot \frac{0,32}{100} + \frac{10}{2} \cdot \frac{0,11}{100} + \frac{12}{2} \cdot \frac{0,03}{100} + 0,214 = 2,214 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Stechiometrické množství vlhkosti z paliva

$$O_{H_2O}^{sp} = O_{H_2O}^S - O_{H_2O}^V = 2,2136 - 0,214 = 1,999 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.11)$$

Minimální objem vlhkých spalín

$$O_{SV_{\min}} = O_{SS_{\min}} + O_{H_2O}^S = 8,582 + 2,214 = 10,796 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.12)$$

Hustota stechiometrických spalín

$$\rho_{SV_{\min}} = \frac{\sum O_i \cdot \rho_i}{O_{SV_{\min}}} = \frac{O_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + O_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + O_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + O_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{SV_{\min}}} \quad (2.13)$$

$$\rho_{SV_{\min}} = \frac{1,016 \cdot 1,9768 + 7,4779 \cdot 1,2505 + 0,0881 \cdot 1,7839 + 1,999 \cdot 0,8058}{10,796} = 1,232 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Tabulka 2.3 Hustota plynů

	$\rho_i [\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
O ₂	1,429
N ₂	1,2505
CO ₂	1,9768
vodní pára	0,8058
suchý vzduch	1,2928
argon	1,7839

Hustota vzduchu

$$\rho_{VV} = \frac{O_{VS_{\min}} \cdot \rho_{VS} + (\chi_v - 1) \cdot O_{VS_{\min}} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{VV_{\min}}} = \frac{9,571 \cdot 1,29279 + (1,022 - 1) \cdot 9,571 \cdot 0,8058}{9,785} \quad (2.14)$$

$$\rho_{VV} = 1,282 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Hustota spalín s přebytkem vzduchu $\alpha=1,05$

$$\rho_{SV} = \frac{O_{SV_{\min}} \cdot \rho_{SV_{\min}} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV_{\min}} \cdot \rho_{VV}}{O_{SV_{\min}} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV_{\min}}} = \frac{10,796 \cdot 1,232 + (1,05 - 1) \cdot 9,785 \cdot 1,282}{10,796 + (1,05 - 1) \cdot 9,785} \quad (2.15)$$

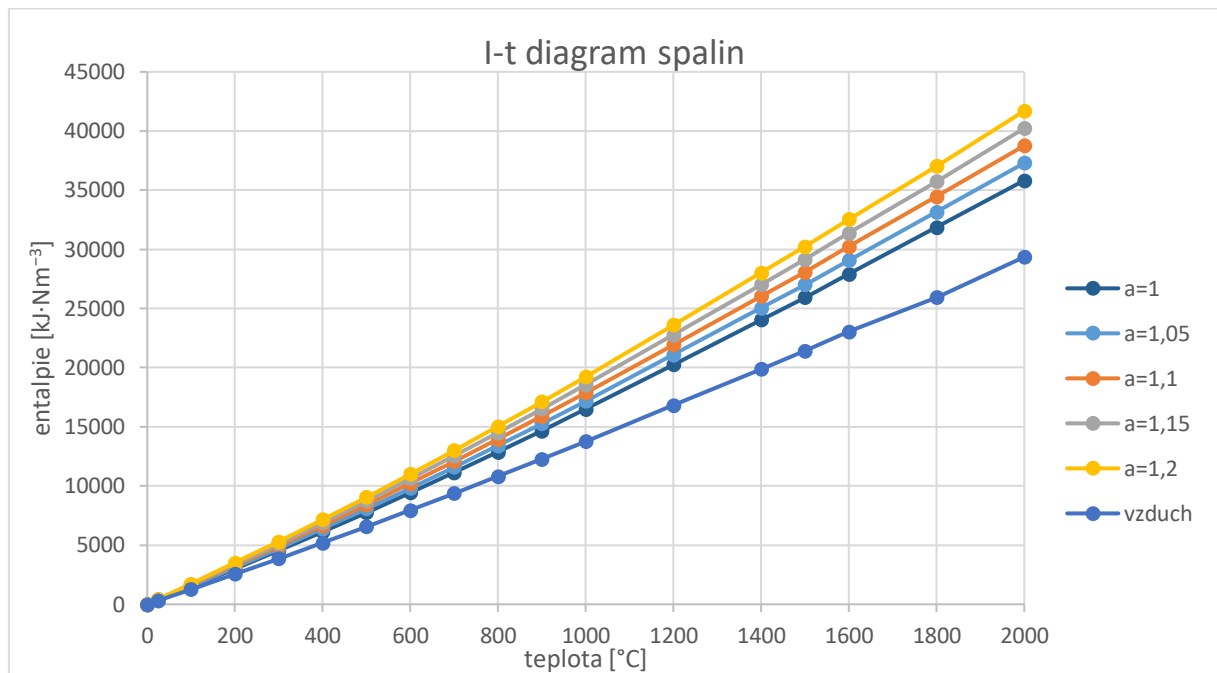
$$\rho_{SV} = 1,234 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Tabulka 2.4 Měrná entalpie složek spalín

t[°C]	i							
	O ₂	N ₂	CO ₂	Ar	SO ₂	CO	suchý vzduch	vodní pára
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	32,78	32,53	41,62	23,32	46,81	32,49	32,57	39,1
100	131,7	130	170	93,07	191,2	130,2	130	150,5
200	267	260,7	357,5	186	394,1	261,4	261,4	304,5
300	406,8	393,3	558,9	278,8	610,4	395	395,1	462,6
400	550,9	528,4	772	371,7	836,5	531,7	531,7	626,3
500	698,7	666,1	994,4	464,7	1070	671,6	671,6	795,1
600	849,9	807,2	1225	557,3	1310	814,3	813,9	968,8
700	1003	951,2	1462	650,2	1554	960,4	959,6	1149
800	1159	1097	1705	743,1	1801	1109	1107	1334
900	1318	1246	1952	835,7	2052	1260	1258	1526
1000	1477	1397	2203	928,2	2304	1413	1410	1723
1200	1804	1708	2753	1114	2808,5	1728	1723	2120
1400	2134	2022	3276,5	1200	3323	2046	2034	2544
1500	2293	2175	3503	1393	3587	2199	2193	2779
1600	2465	2338	3812	1486	3838	2365	2358	2981
1800	2803,5	2660	4348	1622	4363	2682,9	2653	3429
2000	3138	2978	4844	1857	4890	3008	3002	3925

Tabulka 2.5 I-t tabulka spalín

t [°C]	I _{smin}	I _{vmin}	I _{Sα} = I _{Smin} + (α-1) · I _{Vmin} [kJ·mN ⁻³]				
	[kJ/mN ³]	[kJ/mN ³]	a=1	a=1,05	a=1,1	a=1,15	a=1,2
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	374,146	320,096	374,146	390,151	406,156	422,160	438,165
100	1486,185	1276,440	1486,185	1550,007	1613,829	1677,651	1741,473
200	3003,119	2567,030	3003,119	3131,470	3259,822	3388,173	3516,524
300	4557,447	3880,510	4557,447	4751,472	4945,498	5139,523	5333,549
400	6154,761	5222,946	6154,761	6415,909	6677,056	6938,203	7199,350
500	7792,265	6598,057	7792,265	8122,168	8452,071	8781,974	9111,877
600	9474,336	7997,188	9474,336	9874,196	10274,055	10673,915	11073,774
700	11199,010	9430,253	11199,010	11670,523	12142,036	12613,548	13085,061
800	12953,865	10880,616	12953,865	13497,896	14041,927	14585,958	15129,989
900	14752,183	12366,933	14752,183	15370,529	15988,876	16607,223	17225,569
1000	16580,578	13863,893	16580,578	17273,773	17966,968	18660,162	19353,357
1200	20360,150	16944,591	20360,150	21207,379	22054,609	22901,838	23749,068
1400	24186,210	20011,934	24186,210	25186,807	26187,403	27188,000	28188,597
1500	26097,635	21584,030	26097,635	27176,837	28256,038	29335,240	30414,441
1600	28085,805	23206,481	28085,805	29246,129	30406,453	31566,777	32727,101
1800	32041,917	26125,834	32041,917	33348,208	34654,500	35960,792	37267,083
2000	36042,446	29572,291	36042,446	37521,061	38999,675	40478,290	41956,904



Graf 2.1 I-t diagram spalín

2.2 Objemy složek spalín s přebytkem vzduchu $\alpha=1,05$

Objem vodní páry (2.16)

$$O_{H_2O}^a = O_{H_2O}^s + (\alpha - 1) \cdot O_{H_2O}^v = 2,214 + (1,05 - 1) \cdot 0,214 = 2,224 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Objem oxidu uhličitého (2.17)

$$O_{CO_2}^a = O_{CO_2} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS_{\min}} \cdot 0,0003 = 1,016 + (1,05 - 1) \cdot 9,571 \cdot 0,0003 = 1,0161 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Objem dusíku (2.18)

$$O_{N_2}^a = O_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS_{\min}} \cdot 0,7805 = 7,478 + (1,05 - 1) \cdot 9,571 \cdot 0,7805 = 7,851 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Objem argonu (2.19)

$$O_{Ar}^a = O_{Ar} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS_{\min}} \cdot 0,0092 = 0,0881 + (1,05 - 1) \cdot 9,571 \cdot 0,0092 = 0,0925 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Objem kyslíku (2.20)

$$O_{O_2}^a = O_{O_2} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS_{\min}} \cdot 0,21 = 0 + (1,05 - 1) \cdot 9,571 \cdot 0,21 = 0,1005 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Celkový objem suchých spalín

$$O_{SS}^a = O_{CO_2}^a + O_{N_2}^a + O_{Ar}^a + O_{O_2}^a = 1,0161 + 7,851 + 0,0925 + 0,1005 = 9,0605 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.21)$$

Celkový objem vlhkých spalín

$$O_{SV}^a = O_{SS}^a + O_{H_2O}^a = 9,0605 + 2,224 = 11,285 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.22)$$

2.3 Entalpie spalín s přebytkem vzduchu $\alpha=1,05$ a užitím recirkulace spalín

Recirkulace spalín je použita k potlačení tvorby NOx při spalování. Po odborné konzultaci byl zvolen součinitel recirkulace $r=0,2$.

Celkový objem vlhkých spalín s recirkulací

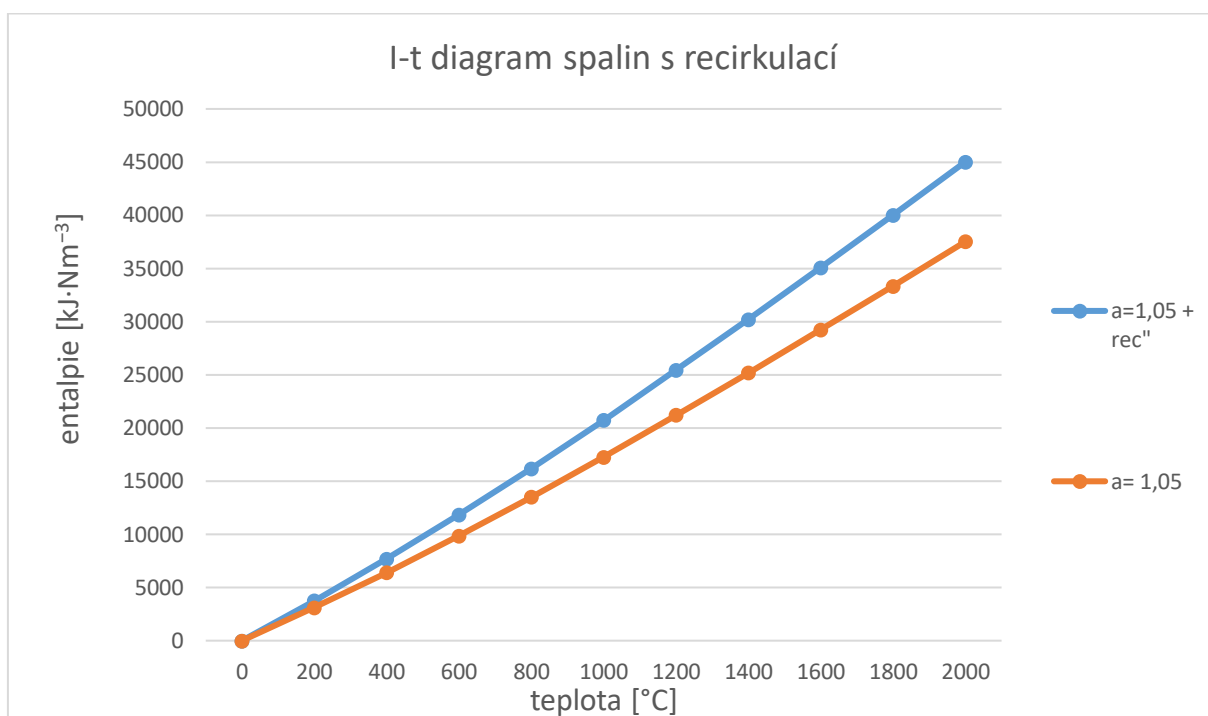
$$O_{SVr}^a = O_{SV}^a + r \cdot O_{SV}^a = 13,542 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (2.23)$$

Tabulka 2.6 Složky spalín s recirkulací

Složka spalín	Hodnota	Procento
O ₂	0,121 Nm ³	0,89
H ₂ O	2,669 Nm ³	19,70
N ₂	9,422 Nm ³	69,58
Ar	0,111 Nm ³	0,82
CO ₂	1,219 Nm ³	9,00

Tabulka 2.7 Entalpie spalín s rec.

t[°C]	I _{sp} [kJ/mN ³]
0	0,0000
25	468,1412
100	1860,0248
200	3757,7438
300	5701,7846
400	7699,1228
500	9746,3672
600	11849,0884
700	14004,5483
800	16197,4448
900	18444,3807
1000	20728,3720
1200	25448,8599
1400	30226,6568
1500	32612,1950
1600	35094,9374
1800	40033,9815
2000	45025,1848



Graf 2.2 I-t diagram spalín s rec.

3 Rosný bod

V palivu není obsažena síra. Díky tomu můžeme určit teplotu rosného bodu pouze z parciálního tlaku vodní páry.

Střední zdánlivá hmotnost suchých spalín

$$M = \sum_i M_i \cdot x_i = M_{N_2} \cdot x_{N_2} + M_{CO_2} \cdot x_{CO_2} + M_{O_2} \cdot x_{O_2} + M_{Ar} \cdot x_{Ar} \quad (3.1)$$

$$M = 28 \cdot 0,866 + 44 \cdot 0,1121 + 32 \cdot 0,011 + 39,9 \cdot 0,0102 = 29,96 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

Měrná plynová konstanta suchých spalín

$$r_v = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{29,96} = 277,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (3.2)$$

R_m ...měrná plynová konstanta

$$R_m = 8314 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Měrná vlhkost

$$x = \frac{M_{H_2O} \cdot x_{H_2O}}{M} = \frac{18 \cdot 0,197}{29,96} = 0,118 \text{ kg} \cdot \text{kgs.v.}^{-1} \quad (3.3)$$

Parciální tlak vodní páry

$$p_p = \frac{x \cdot p_c}{\frac{r_v}{r_p} + x} = \frac{0,118 \cdot 101325}{\frac{277,5}{462} + 0,118} = 19976,5 \text{ Pa} \quad (3.4)$$

Rosný bod určený z tabulek podle parciálního tlaku páry

$$t_r = 60,03^\circ \text{C}$$

4 Ztráty kotle

Teplo přivedené do kotle na 1kg paliva

Na základě odborné konzultace zanedbáváme fyzické teplo paliva a teplo přivedené cizím zdrojem.

$$Q_i = 35990 = kJ \cdot Nm^{-3}$$

Komínová ztráta

$$Z_k = \frac{I_S^{t_k, a_k} - \alpha_k \cdot I_{VZ}}{Q_i} \quad (4.1)$$

Entalpie spalin při teplotě $t_k = 95^\circ C$ a přebytku vzduchu $= 1,05 \alpha$ k za kotlem

$$I_S^{95^\circ C, a_k} = 1770 kJ \cdot Nm^{-3}$$

$$Z_k = \frac{1770 - 1,05 \cdot 320,1}{35990} = 0,0398$$

Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SS_{min}}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_{ired}} \quad (4.2)$$

$$mgCO = 100 mg \cdot Nm^{-3}$$

$$O_{2ref} = 3\%$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 100 \cdot 8,582}{(21 - 3) \cdot 35990} = 0,0003$$

Ztráty sáláním a vedením tepla do okolí

$$Z_{sv} = 0,0028 \quad \text{Odečteno z grafu}$$

Nepočitatelné ztráty

$$Z_n = 0 \quad \text{Po odborné konzultaci zanedbáváme}$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - Z_k - Z_{CO} - Z_{sv} - Z_n = 1 - 0,0398 - 0,0003 - 0,0028 - 0 = 0,957 \quad (4.3)$$

5 Výkon kotle

Entalpie přehřáté páry (10,5 MPa; 520 °C) = 3420,6 kJ · kg

Entalpie napájecí vody (11,3 MPa; 145 °C) = 617,65 kJ · kg

Hmotnostní tok přehřáté páry

$$M_{pp} = 100 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 27,778 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výrobní teplo páry

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) \quad (5.1)$$

$$Q_v = 27,778 \cdot (3420,6 - 617,65) = 77,86 \text{ MW}$$

Tepelný příkon paliva

$$P = \frac{Q_v}{\eta} = \frac{77,86}{0,957} = 81,39 \text{ MW} \quad (5.2)$$

Množství paliva přivedeného do kotle

$$m_p = \frac{Q_v}{\eta \cdot Q_i} = \frac{77,86}{0,957 \cdot 35,99} = 2,26 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.3)$$

Množství spáleného paliva

$$M_{pal} = m_p = 2,26 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

6 Výpočet ohniště

6.1 Návrh spalovací komory

Objem spalovací komory

$$V_o = 11 \cdot 5,13 \cdot 5,4 - 2 \cdot \left(\frac{0,31 \cdot 2,55}{2} \right) \cdot 5,4 = 300,4 \text{ m}^3 \quad (6.1)$$

Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_{pal} \cdot Q_i}{V_o} = \frac{2,26 \cdot 35990}{300,4} = 270,9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.2)$$

Povrch stěn ohniště

$$\begin{aligned} S_{st} &= 2 \cdot (11 - 0,31) \cdot 5,13 + 2 \cdot (11 - 0,31) \cdot 5,4 + \\ &+ 5,4 \cdot 5,13 + 2 \cdot 2,55 \cdot 5,4 + ((4 \cdot 0,31 \cdot 2,55) / 2) \\ S_{st} &= 282,5 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (6.3)$$

Součinitel tepelné efektivnosti

$$\bar{\mu} = x \cdot \zeta = 0,65$$

Úhlový součinitel osálení pro membránové stěny $x=1$

Součinitel zanesení stěn ohniště (pro plyn) $\zeta = 0,65$ [1]

6.2 Tepelný výpočet ohniště

Teplo přivedené horkým vzduchem

$$Q_{vz} = 1,05 \cdot I_{vz}^{102} = 1302,0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.4)$$

I_{vz}^{102} ... entalpie přiváděného spalovacího vzduchu

Redukovaná výhřevnost

$$Q_{ired} = Q_i + Q_{r3} + Q_c + i_{pv} = 35990 + 353,5 = 36343,5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.5)$$

Q_i ... výhřevnost paliva

Q_{r3} ... teplo ve spalinách recirkulace

Q_c ... teplo přivedené cizím zdrojem (neuvažují)

i_{pv} ... fyzické teplo paliva (neuvažují)

Celkové užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$Q_u = Q_{ired} \cdot (1 - Z_{co} - Z_c - Z_f) + Q_{vz} - Q_c = 36343 \cdot (1 - 0,0003 - 0) + 1302 = 37634,5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.6)$$

Entalpie nechlazeného plamene:

$$I_{np} = \frac{Q_u}{(1 + r_1) \cdot (1 + r_3)} = \frac{37634,5}{(1 + 0) \cdot (1 + 0,2)} = 31362,1 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (6.7)$$

Pro tuto entalpii vychází teplota nechlazeného plamene:

$$t_{np} = 1447,6^{\circ}\text{C}$$

Součinitel M

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_{pl} \quad (6.8)$$

Poloha maximální teploty plamene

$$x_{pl} = x_h + \Delta x \quad (6.9)$$

$$x_h = \frac{h_h}{h_o} \quad (6.10)$$

$$h_h = 2,25$$

$$h_o = 11 - 0,5 \cdot 1,8 = 10,1m$$

$$x_h = \frac{2,25}{10,1} = 0,223$$

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot 0,223 = 0,495$$

Boltzmannovo číslo

$$Bo = \frac{(1 - Z_{sv}) \cdot m_p \cdot (\overline{O_s c_s})_o}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot S_{st} \cdot (273 + t_{np})^3} \quad (6.11)$$

Střední tepelná jímavost spalin v ohništi

(6.12)

$$(\overline{O_s c_s})_o = \frac{Q_u - (1 + r_1) \cdot (1 + r_3) \cdot I_{sp}^{t_{ok}}}{t_{np} - t_{ok}} = \frac{38214,85 - (1 + 0) \cdot (1 + 0,2) \cdot 22227}{1467,9 - 1063,5} = 28,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Odhadovaná teplota spalin na konci ohniště

$$t_{ok} = 1056,6^{\circ}\text{C}$$

Entalpie spalin na výstupu z ohniště ($\alpha = 1,05$)

$$I^{t_{ok}} = 22066,6 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

$$Bo = \frac{(1 - 0,0032) \cdot 2,26 \cdot 28,5}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,65 \cdot 282,5 \cdot (273 + 1447,6)^3} = 1,21$$

Stupeň černosti ohniště

$$a_o = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi} \quad (6.13)$$

Stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} \quad (6.14)$$

Stupeň černosti svítivé části

$$a_{sv} = 1 - e^{-(k_s \cdot r_s + k_{sz}) \cdot p \cdot s} \quad (6.15)$$

Stupeň černosti nesvítivé části

$$a_{ns} = 1 - e^{-k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s} \quad (6.16)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s \quad (6.17)$$

Objemové podíl tříatomových plynů

$$r_s = r_{H_2O} + r_{CO_2} = \frac{O_{H_2O} + O_{CO_2}}{O_{spr}} = 0,2871 \quad (6.18)$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{300,4}{282,5} = 3,82 \quad (6.19)$$

Parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách

$$p_s = r_s \cdot p = 0,2871 \cdot 0,1 = 0,02871 \text{ MPa} \quad (6.20)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,191}{\sqrt{0,0287 \cdot 3,82}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1056,6 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,287 = 1,215$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_{sz} = 0,306 \cdot (2 - \alpha) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (6.21)$$

Poměr obsahu vodíku a uhlíku v původním vzorku

$$\begin{aligned} \frac{C^r}{H^r} &= 0,12 \cdot \sum_i \left(\frac{m}{n} \right) \cdot (C_m H_n)_i = \\ &= 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 83,5 + \frac{2}{6} \cdot 3,6 + \frac{3}{8} \cdot 0,7 + \frac{4}{10} \cdot 0,2 + \frac{5}{12} \cdot 0,1 \right) = 2,985 \end{aligned} \quad (6.22)$$

$$k_{sz} = 0,306 \cdot (2 - 1,05) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{1063,5 + 273,15}{1000} - 0,5 \right) \cdot 2,985 = 1,68$$

$$a_{sv} = 1 - e^{-(k_s \cdot r_s + k_{sz}) \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-(1,215 + 1,68) \cdot 0,1 \cdot 3,863} = 0,673$$

$$a_{ns} = 1 - e^{-k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,215 \cdot 0,1 \cdot 3,863} = 0,372$$

Součinitel zaplnění ohniště svítivým plamenem

$$m = 0,1$$

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0,1 \cdot 0,673 + (1 - 0,1) \cdot 0,372 = 0,404 \quad (6.23)$$

$$a_o = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi} = \frac{0,404}{0,404 + (1 - 0,404) \cdot 0,65} = 0,51 \quad (6.24)$$

Teplota na konci ohniště

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{Bo} \right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1447,6 + 273,15}{1 + 0,495 \cdot \left(\frac{0,51}{1,21} \right)^{0,6}} - 273,15 = 1056,6^\circ\text{C} \quad (6.25)$$

Entalpie spalin na konci ohniště při $\alpha=1,05$

$$I_{ok} = 22066,6 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Teplo uvolněné v ohništi

$$Q_o = m_p \cdot (1 - Z_{sv}) \cdot (Q_u - I_{ok}) = 2,26 \cdot (1 - 0,0028) \cdot (37634,5 - 22066,6) = 35108,5 \text{ kW} \quad (6.26)$$

7 Návrh teplosměnných ploch

7.1 Návrh teplosměnných ploch ze strany pracovního média

Tabulka 7.1 Parametry pracovního média

Teplosměnná plocha		Teplota[°C]	tlak[MPa]	Entalpie [kJ·kg ⁻¹]	Entalpický spád
Přehřívák PIII	vstup	414,90	10,70	3128,60	292,00
	výstup	520,00	10,50	3420,60	
Přehřívák PII	vstup	343,80	10,90	2863,3	343,00
	výstup	441,30	10,70	3206,3	
Přehřívák PI	vstup	318,10	11,10	2704,00	255,8
	výstup	366,60	10,90	2959,8	
Výparník	vstup	318,10	11,10	1335,10	1368,90
	výstup	318,10	11,10	2704,00	
EKO2	vstup	229,00	11,20	987,40	188,6
	výstup	267,00	11,10	1176,00	
EKO1	vstup	145,00	11,30	617,70	369,8
	výstup	229,00	11,20	987,40	

Výpočet vstříku V23

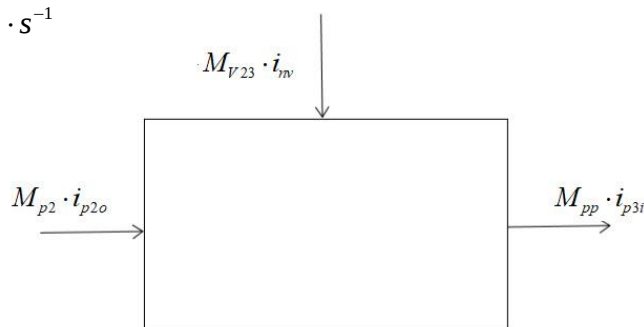
$$M_{pp} \cdot i_{p3i} = M_{p2} \cdot i_{p2o} + M_{V23} \cdot i_{nv} \quad (7.1)$$

$$i_{p2o} = \frac{M_{pp} \cdot i_{p3i} - M_{V23} \cdot i_{nv}}{M_{p2}} = \frac{27,78 \cdot 3128,6 - 0,833 \cdot 617,7}{26,95} = 3206,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7.2)$$

$$M_{V23} = 0,833 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$M_{p2} = M_{pp} - M_{V23} \quad (7.3)$$

$$M_{p2} = 27,78 - 0,833 = 26,95 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$



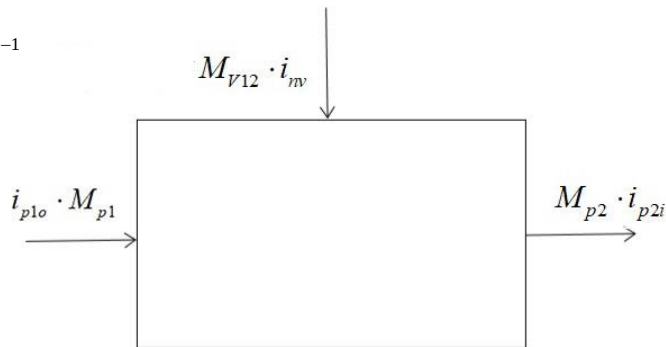
Obrázek 7.1 Schéma vstříku V23

Výpočet vstříku V12

$$i_{p1o} = \frac{M_{p2} \cdot i_{p2i} - M_{V12} \cdot i_{nv}}{M_{p1}} = \frac{26,95 \cdot 2863,3 - 1,08 \cdot 617,7}{25,87} = 2959,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7.4)$$

$$M_{V12} = 1,078 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$M_{p1} = 26,95 - 1,078 = 25,87 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obrázek 7.2 Schéma vstříku V12

7.2 Tepelný výkon na straně pracovního média

Z vypočtených hmotnostních toků a zvolených hodnot v tabulce 7.1 můžeme určit tepelný výkon na straně pracovního média.

Přehřívák PIII

$$Q_{P3} = M_{pp} \cdot (i_{p3o} - i_{p3i}) = 27,78 \cdot (3420,6 - 3128,6) = 8111,8 \text{ kW} \quad (7.5)$$

Přehřívák PII

$$Q_{P2} = M_{p2} \cdot (i_{p2o} - i_{p2i}) = 26,95 \cdot (3206,3 - 2863,3) = 9243,9 \text{ kW} \quad (7.6)$$

Přehřívák PI

$$Q_{P1} = M_{p1} \cdot (i_{p1o} - i_{p1i}) = 25,87 \cdot (2959,8 - 2704) = 6618,6 \text{ kW} \quad (7.7)$$

Výparník

$$Q_{Vyp} = M_{p1} \cdot (i_{Vypo} - i_{Vypi}) = 25,87 \cdot (2704 - 1335,1) = 35413,4 \text{ kW} \quad (7.8)$$

Ekonomizér II

$$Q_{EI} = M_{p1} \cdot (i_{EIlo} - i_{EIli}) = 25,87 \cdot (1335,1 - 987,4) = 8995 \text{ kW} \quad (7.9)$$

Ekonomizér I

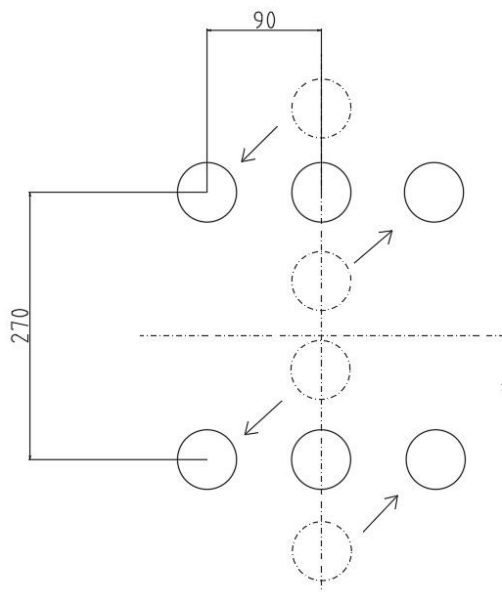
$$Q_{EI} = M_{p1} \cdot (i_{EIlo} - i_{EIli}) = 25,87 \cdot (987,4 - 617,6) = 9566,7 \text{ kW} \quad (7.10)$$

Celkové teplo

$$Q_c = Q_{P3} + Q_{P2} + Q_{P1} + Q_{Vyp} + Q_{EI} + Q_{EI} = 77949,4 \text{ kW} \quad (7.11)$$

8 Mříž

Jedná se o rozvolněnou membránovou stěnu, skrze kterou proudí spaliny do druhého tahu kotle. Uspořádání trubek je za sebou.



Obrázek 1. Rozvolněná mem. stěna

Tabulka 8.1 Geometri mříže

Parametr	Značka	Rozměr
Vnější průměr trubek	D	0,0603 m
Příčná rozteč	s_1	0,270 m
Podélná rozteč	s_2	0,09 m
Počet trubek v řadě	n_{tr}	19
Počet řad	n_r	3
Výška mříže	c	1,8 m
Šířka kanálu	a	5,13 m

Teplota na konci ohniště

$$t_{ok} = 1056,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Předpokládaná teplota za mříží

$$t_{mo} = 1031,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{ok} + t_{mo}}{2} = 1044,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.1)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{7,1} \cdot \frac{273,15 + 1044,2}{273,15} = 20,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8.2)$$

Průtočný průřez

$$S = a \cdot c - n_{tr} \cdot D \cdot c = 5,13 \cdot 1,8 - 19 \cdot 0,0603 \cdot 1,8 = 7,1 \text{ m}^2 \quad (8.3)$$

8.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro příčné proudění a trubky uspořádané za sebou platí vztah

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \left(\frac{\lambda}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (8.4)$$

Korekční součinitel na počet řad

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_f - 2) = 0,923 \quad (8.5)$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na příčné rozteči

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 4,48 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,49}{2} \right)^3 \right]} = 0,83 \quad (8.6)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{270}{60,3} = 4,48 \quad (8.7)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{90}{60,3} = 1,49 \quad (8.8)$$

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda = 0,121 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 1,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,605$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,923 \cdot 0,83 \cdot \left(\frac{0,121}{0,0603} \right) \cdot \left(\frac{20,6 \cdot 0,0603}{1,91 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,605^{0,33} = 71,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

8.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\alpha_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (8.9)$$

Absolutní střední teplota spalin

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 1044,2 + 273,15 = 1317,4 \text{ K} \quad (8.10)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{vyp} + \Delta t + 273,15 = 318,1 + 25 + 273,15 = 616,3 \text{ K} \quad (8.11)$$

Stupeň černosti povrchu (viz [1])

$$a_{st} = 0,8$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,27 \cdot 0,09}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,408 \text{ m} \quad (8.12)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (8.13)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 0,408}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1317,4}{1000} \right) \cdot 0,287 = 4,6$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = 4,6 \cdot 0,1 \cdot 0,408 = 0,186 \text{ m}^2 \quad (8.14)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,186} = 0,17 \quad (8.15)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot 1317,4^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{616,3}{1317,4}\right)^{3,6}}{1 - \frac{616,3}{1317,4}} = 35,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

8.3 Výsledný součinitel přestupu tepla a tepelný výkon

Výsledný součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{cel} = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal} = 1 \cdot 71,4 + 35 = 106,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.16)$$

Součinitel omývání plochy $\omega = 1$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_{cel} = 0,85 \cdot 106,4 = 90,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.17)$$

Součinitel tepelné efektivity stěn $\psi = 0,85$

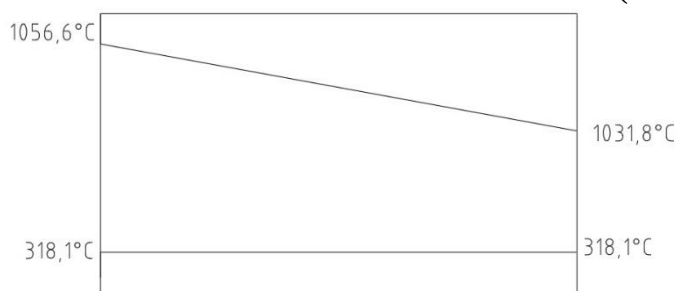
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (8.18)$$

$$\Delta t_1 = t_{ok} - t_{vyp} = 1056,6 - 318,1 = 738,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.19)$$

$$\Delta t_2 = t_{mo} - t_{vyp} = 1031,8 - 318,1 = 713,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.20)$$

$$\Delta t = \frac{738,5 - 713,7}{\ln \frac{738,5}{713,7}} = 726,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 8.2 Teplotní spád

8.4 Teplo odebrané mříží

Plocha mříže

$$S_m = \pi \cdot D \cdot c \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 1,8 \cdot 59 = 20,1 \text{ m}^2 \quad (8.21)$$

Odebrané teplo

$$Q_m = S_m \cdot k \cdot \Delta t = 20,1 \cdot 90,4 \cdot 726,1 = 1320,4 \text{ kW} \quad (8.22)$$

Entalpie odchozích spalin

$$i_{mo} = \frac{m_{pv} \cdot i_{mi} - Q_m}{m_{pv}} = \frac{2,26 \cdot 22066,6 - 1320,4}{2,26} = 21482,8 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (8.23)$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_{mo} = 1031,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

9 Obratová komora

Jedná se o prostor navazující na mříž, který sahá po první přehřívací PIII.

Teplota spalin na vstupu

$$t_{obi} = 1031,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Předpoklad teploty na výstupu

$$t_{obo} = 1004,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{obst} = \frac{(1031,8 + 1004)}{2} = 1017,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9.1)$$

Průtočná plocha spalin

$$S = \frac{(a \cdot b + a \cdot c)}{2} = \frac{(5,13 \cdot 2,16 + 5,13 \cdot 1,8)}{2} = 10,15 \text{ m}^2 \quad (9.2)$$

b... zvolená délka 2. tahu = 2,16 m

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{10,15} \cdot \frac{273,15 + 1017,9}{273,15} = 14,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.3)$$

9.1 Membránová stěna

9.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (9.4)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,118 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,608$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (5,13 + 2,16) = 14,58 \text{ m} \quad (9.5)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot 10,15}{14,58} = 2,79 \text{ m} \quad (9.6)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \left(\frac{0,118}{2,79} \right) \cdot \left(\frac{14,3 \cdot 2,79}{1,83 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,608^{0,4} = 14,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

9.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (9.7)$$

Absolutní střední teplota spalín

$$T_s = t_{obst} + 273,15 = 1017,9 + 273,15 = 1291,1 \text{ K} \quad (9.8)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{vyp} + \Delta t + 273,15 = 318,1 + 25 + 273,15 = 616,3 \text{ K} \quad (9.9)$$

Stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

Objem sálajícího povrchu

$$V = a \cdot b \cdot c = 5,13 \cdot 2,16 \cdot 1,8 = 19,95 \text{ m}^3 \quad (9.10)$$

Povrch sálajícího prostoru

$$S_{ob} = 2 \cdot a \cdot c + 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot b \cdot c = 2 \cdot 5,13 \cdot 1,8 + 2 \cdot 5,13 \cdot 2,16 + 2 \cdot 2,16 \cdot 1,8 = 48,4 \text{ m}^2 \quad (9.11)$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{ob}} = 3,6 \cdot \frac{19,95}{48,4} = 1,483 \text{ m} \quad (9.12)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (9.13)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 1,483}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1291,1}{1000} \right) \cdot 0,287 = 4,16$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = 4,16 \cdot 0,1 \cdot 1,483 = 0,618 \quad (9.14)$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,618} = 0,461 \quad (9.15)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,461 \cdot 1290,9^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{616,3}{1291,1} \right)}{1 - \frac{616,3}{1291,1}} = 90,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla ze strany pracovního média neuvažujeme.

9.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín pro membránové stěny

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_{sal}) = 0,85 \cdot (14,8 + 90,6) = 89,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9.16)$$

ω ... součinitel omývání plochy po odborné konzultaci volím $\omega=0,85$

Součinitel prostupu tepla pro membránovou stěnu

$$k = \psi \cdot \alpha_{sp} = 0,85 \cdot 89,57 = 76,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9.17)$$

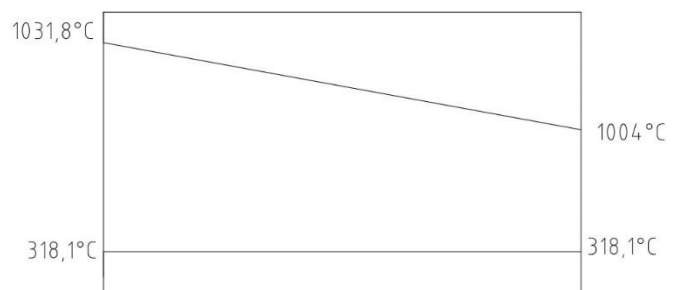
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (9.18)$$

$$\Delta t_1 = t_{obi} - t_{vyp} = 1031,8 - 318,1 = 713,7^\circ\text{C} \quad (9.19)$$

$$\Delta t_2 = t_{obo} - t_{vyp} = 1004 - 318,1 = 685,9^\circ\text{C} \quad (9.20)$$

$$\Delta t = \frac{713,7 - 685,9}{\ln \left(\frac{713,7}{685,9} \right)} = 699,7^\circ\text{C}$$



Obrázek 9.1 Teplotní spád

Celková plocha membránové stěny

$$S = a \cdot b + 2 \cdot b \cdot c + c \cdot \check{s} = 5,13 \cdot 2,16 + 2 \cdot 2,16 \cdot 1,8 + 1,8 \cdot 5,13 = 28,1 \text{ m}^2 \quad (9.21)$$

Teplný výkon přijatý membránovou stěnou

$$Q_{ms} = k \cdot \Delta t \cdot S = 76,13 \cdot 699,7 \cdot 28,1 = 1496,5 \text{ kW} \quad (9.22)$$

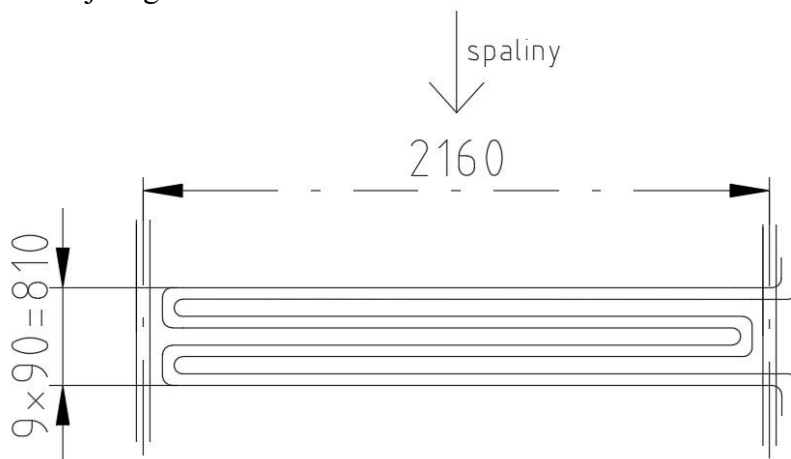
Entalpie spalín na konci obrátové komory

$$i_{obo} = 20821,1 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalín $t_{obo} = 1004,0^\circ\text{C}$

10 Přehřívák PIII

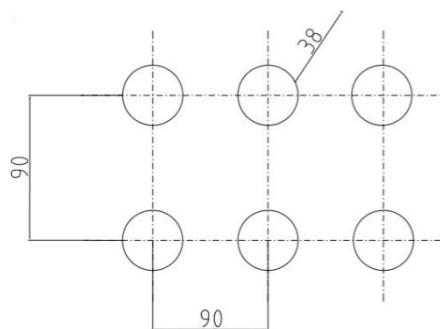
Přehřívák PIII je prvním přehřívákem na cestě spalin. Nachází se v druhém tahu za obrátovou komorou. Jedná se o souproudý, příčně obtékaný svazek, tvořený hladkými trubkami. V jeho oblasti pokračuje membránová stěna, která je obtékána podélně. Výstupní teplota páry z přehříváku je regulována vstřikem V23.



Obrázek 10.1 Náčrt přehříváku 3

Tabulka 10.1 Parametry přehříváku P3

	Značka	Rozměr
Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,0036 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0308 m
Příčná rozteč	s ₁	0,09 m
Podélná rozteč	s ₂	0,09 m
Efektivní délka trubek	l _e	1,98 m
Počet trubek v řadě	n _{tr}	57
Počet řad	n _r	10



Obrázek 10.2. Uspořádání trubek P3

Teplota spalin na vstupu

$$t_{3i} = 1004 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Předpokladaná teplota spalin na konci

$$t_{3o} = 865,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{3i} + t_{3o}}{2} = \frac{1004 + 865,85}{2} = 934,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (10.1)$$

Teplota páry na vstupu

$$t_{p3i} = 414,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Teplota páry na výstupu

$$t_{p3o} = 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota páry

$$t_{st} = \frac{t_{p3i} + t_{p3o}}{2} = \frac{414,9 + 520}{2} = 467,5 \text{ °C} \quad (10.2)$$

Průtočná plocha spalín

$$S_p = a \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot l_e = 5,13 \cdot 2,16 - 60 \cdot 0,038 \cdot 1,98 = 6,8 \text{ m}^2 \quad (10.3)$$

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{6,8} \cdot \frac{273,15 + 934,9}{273,15} = 19,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10.4)$$

10.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \left(\frac{\lambda}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (10.5)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

$$C_z = 1$$

$$z2 > 10$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,37 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,37}{2} \right)^3 \right]} = 1,022 \quad (10.6)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (10.7)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (10.8)$$

Tepelná vodivost spalín

$$\lambda = 0,116 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalín

$$\nu = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,614$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,022 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,116}{0,038} \right) \cdot \left(\frac{19,95 \cdot 0,038}{1,68 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,614^{0,33} = 128,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

10.2 Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (10.9)$$

Absolutní střední teplota spalín

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 934,9 + 273,15 = 1208,1 \text{ K} \quad (10.10)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{pst} + \Delta t + 273,15 = 467,45 + 25 + 273,15 = 765,6 \text{ K} \quad (10.11)$$

Stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,21 \text{ m} \quad (10.12)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (10.13)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 0,21}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1208,1}{1000} \right) \cdot 0,287 = 6,9$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = 6,9 \cdot 0,1 \cdot 0,21 = 0,146 \quad (10.14)$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,146} = 0,136 \quad (10.15)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,136 \cdot 1208,1^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{765,6}{1208,1} \right)}{1 - \frac{765,6}{1208,1}} = 27,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Zvětšení součinitele přestupu tepla sáláním volných proctor

Teplota spalin před svazkem

$$T_o = 1004 + 273,15 = 1277,2 \text{ K}$$

Koeficient pro plyn $A = 0,3$ viz [1]

Výška volného prostoru $l_o = 0,9 \text{ m}$

Výška svazku $l_s = 0,81 \text{ m}$

$$k_o = 1 + A \cdot \left(\frac{T_o}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_o}{l_s} \right)^{0,07} = 1 + 0,3 \cdot \left(\frac{1277,2}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,9}{0,81} \right)^{0,07} = 1,32 \quad (10.16)$$

$$\alpha'_{sal} = \alpha_{sal} \cdot k_o = 27 \cdot 1,32 = 35,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.17)$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny

$$\alpha_c = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha'_{sal}) = 1 \cdot (128,0 + 35,6) = 163,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.18)$$

10.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (10.19)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,0725 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 7,87 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 1,035$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = D - 2 \cdot t = (38 - 2 \cdot 3,6) \cdot 10^{-3} = 0,308 \text{ m} \quad (10.20)$$

Průtočný průřez trubek

$$S_{tr} = n_{tr} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 57 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} = 0,0424 \text{ m}^2 \quad (10.21)$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,0286 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Průtočná rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot \nu}{S_{tr}} = \frac{27,78 \cdot 0,0286}{0,0424} = 18,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10.22)$$

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{0,0725}{0,0308} \right) \cdot \left(\frac{18,7 \cdot 0,0308}{7,87 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,035^{0,4} = 2699,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_{kp}}} = \frac{0,85 \cdot 163,6}{1 + \frac{163,6}{2699,9}} = 131,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.23)$$

Součinitel tepelné efektivity

$$\psi = 0,85$$

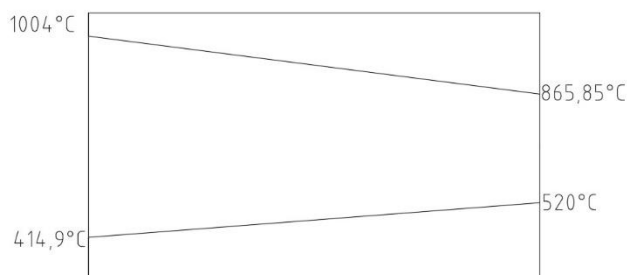
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (10.24)$$

$$\Delta t_1 = 1004 - 414,9 = 589,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.25)$$

$$\Delta t_2 = 865,85 - 520 = 345,85 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.26)$$

$$\Delta t = \frac{589,1 - 345,85}{\ln \frac{589,1}{345,85}} = 456,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 10.3 Teplotní spád P3

Plocha přehříváku PIII

$$S_{PIII} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_r = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,98 \cdot 57 \cdot 10 = 134,7 \text{ m}^2 \quad (10.27)$$

Tepelný výkon přijatý přehřívákem PIII

$$Q_{PIII} = k \cdot \Delta t \cdot S = 131,1 \cdot 456,8 \cdot 134,7 = 8064,8 \text{ kW} \quad (10.28)$$

Tepelný výkon na straně pracovního media

$$Q_{P3} = 8111,8 \text{ kW}$$

Odchylka tepla přijatého spaliny a tepla odvedeného parou

$$\chi = \frac{Q_{P3} - Q_{PIII}}{Q_{P3}} \cdot 100 = \frac{8111,8 - 8064,8}{8111,8} \cdot 100 = 0,58\% \quad (10.29)$$

Odchylka splňuje požadavek velikosti do 2%

10.4 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekci

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (10.30)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 6,8}{252,2} = 0,1077 \text{ m} \quad (10.31)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot (D + l_e) \cdot n_{tr} = 2 \cdot 5,13 \cdot 2,16 + 2 \cdot (0,038 + 1,98) \cdot 57 = 252,2 \text{ m} \quad (10.32)$$

Světlý průřez

$$F = a \cdot b - n_{tr} \cdot l_e \cdot D = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 1,98 \cdot 0,038 = 6,8 \text{ m}^2 \quad (10.33)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,116}{0,1077} \cdot \left(\frac{19,95 \cdot 0,1077}{1,68 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,614^{0,4} = 40,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (10.34)$$

Absolutní střední teplota spalin

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 934,95 + 273,15 = 1208,1 \text{ K} \quad (10.35)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{vyp} + \Delta t + 273,15 = 318,1 + 25 + 273,15 = 616,3 \text{ K} \quad (10.36)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,13 \cdot 1208,1^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{616,3}{1208,1} \right)}{1 - \frac{616,3}{1208,1}} = 22,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal} = 1 \cdot 40,1 + 22,8 = 62,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.37)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0,85 \cdot 62,9 = 53,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.38)$$

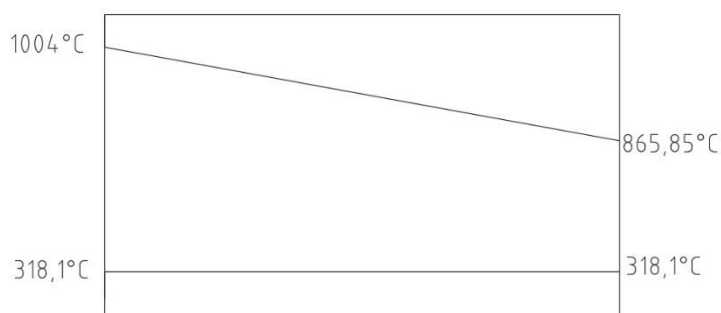
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (10.39)$$

$$\Delta t_1 = 1004 - 318,1 = 685,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.40)$$

$$\Delta t_2 = 865,85 - 318,1 = 547,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.41)$$

$$\Delta t = \frac{685,9 - 547,75}{\ln \frac{685,9}{547,75}} = 614,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 10.4 Teplotní spád mem. stěna

Plocha membránové stěny

$$S_{ms3} = 2 \cdot (l_o + l_s) \cdot (a + b) = 2 \cdot (0,81 + 0,9) \cdot (5,13 \cdot 2,16) = 19,95 \text{ m}^2 \quad (10.42)$$

Tepelný výkon přijatý membránovou stěnou

$$Q_{ms3} = k \cdot \Delta t \cdot S_{ms3} = 53,4 \cdot 614,3 \cdot 19,95 = 654,7 \text{ kW} \quad (10.43)$$

10.5 Tepelná balance

Celkový výkon přijatý v oblasti přehříváku PIII

$$Q_{c3} = Q_{PIII} + Q_{ms3} = 8064,8 + 654,7 = 8719,5 \text{ kW} \quad (10.44)$$

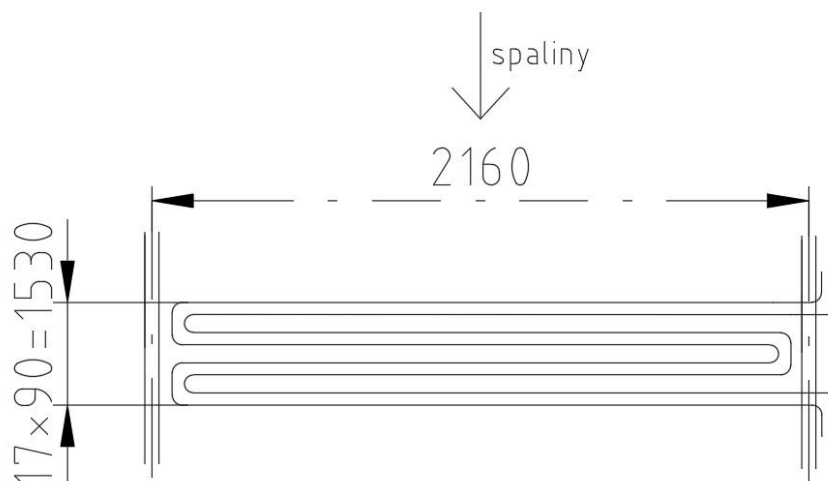
Entalpie spalin na konci PIII

$$i_{3o} = 16965,5 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_{3o} = 865,85 \text{ } ^\circ\text{C}$

11 Přehřívák PII

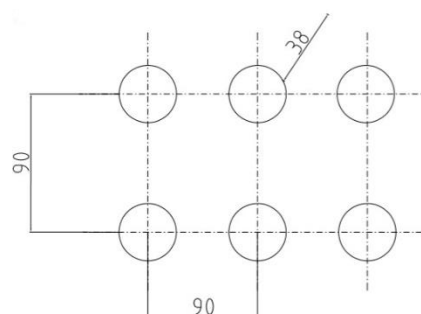
Přehřívák PII je druhým přehřívákem na cestě spalin. Nachází se v druhém tahu za přehřívákem PIII. Jedná se o protiproudý, příčně obtékaný svazek, tvořený hladkými trubkami. V jeho oblasti pokračuje membránová stěna, která je obtékána podélně. Výstupní teplota páry z přehříváku je regulována vstřikem V12.



Obrázek 11.1 Náčrt přehříváku 2

Tabulka 11.1 Parametry přehříváku P2

	Značka	Rozměr
Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,0036 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0308 m
Příčná rozteč	s ₁	0,09 m
Podélná rozteč	s ₂	0,09 m
Efektivní délka trubek	l _e	1,98 m
Počet trubek v řadě	n _{tr}	57
Počet řad	n _ř	18



Obrázek 11.2 Uspořádání trubek P2

Teplota spalin na vstupu

$$t_{2i} = 865,85^{\circ}\text{C}$$

Předpokladaná teplota spalin na konci

$$t_{2o} = 631,5^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_{2i} + t_{2o}}{2} = \frac{865,85 + 631,5}{2} = 748,7^{\circ}\text{C} \quad (11.1)$$

Teplota páry na vstupu

$$t_{p2i} = 343,8^{\circ}\text{C}$$

Teplota páry na výstupu

$$t_{p2o} = 441,3^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota páry

$$t_{st} = \frac{t_{p2i} + t_{p2o}}{2} = \frac{343,8 + 441,3}{2} = 392,6^\circ\text{C} \quad (11.2)$$

Průtočná plocha spalín

$$S_p = a \cdot b - n \cdot D \cdot l_e = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 0,038 \cdot 1,98 = 6,8 \text{ m}^2 \quad (11.3)$$

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{6,8} \cdot \frac{273,15 + 748,7}{273,15} = 16,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11.4)$$

11.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \left(\frac{\lambda}{D}\right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (11.5)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

$$C_z = 1$$

$$z2 > 10$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,37 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,37}{2}\right)^3\right]} = 1,022 \quad (11.6)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (11.7)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (11.8)$$

Tepelná vodivost spalín

$$\lambda = 0,0923 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalín

$$\nu = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,635$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,022 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,0923}{0,038} \right) \cdot \left(\frac{16,9 \cdot 0,038}{1,24 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,635^{0,33} = 110,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

11.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (11.9)$$

Absolutní střední teplota spalín

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 748,7 + 273,15 = 1021,8 \text{ K} \quad (11.10)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{pst} + \Delta t + 273,15 = 392,6 + 25 + 273,15 = 690,7 \text{ K} \quad (11.11)$$

Stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,210 \text{ m} \quad (11.12)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (11.13)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 0,21}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1021,8}{1000} \right) \cdot 0,287 = 7,8$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = 7,8 \cdot 0,1 \cdot 0,210 = 0,164 \quad (11.14)$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,164} = 0,151 \quad (11.15)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,151 \cdot 1021,8^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{690,7}{1021,8} \right)}{1 - \frac{690,7}{1021,8}} = 19,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Zvětšení součinitele přestupu tepla sáláním volných proctor

Teplota spalin před svazkem

$$T_o = 865,85 + 273,15 = 1139 K$$

Koeficient pro plyn $A = 0,3$ viz [1]

Výška volného prostoru $l_o = 0,9 m$

Výška svazku $l_s = 1,53 m$

$$k_o = 1,327$$

$$\alpha'_{sal} = \alpha_{sal} \cdot k_o = 19,3 \cdot 1,327 = 25,5 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (11.16)$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny

$$\alpha_c = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha'_{sal}) = 1 \cdot (110,7 + 25,5) = 136,2 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (11.17)$$

11.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (11.18)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,066 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 5,58 \cdot 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 1,19$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = D - 2 \cdot t = (38 - 2 \cdot 3,6) \cdot 10^{-3} = 0,308 m \quad (11.19)$$

Průtočný průřez trubek

$$S_{tr} = n_{tr} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 57 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} = 0,0424 m^2 \quad (11.20)$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,0229 kg \cdot m^{-3}$$

Průtočná rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp2} \cdot \nu}{S_{tr}} = \frac{26,94 \cdot 0,0229}{0,0424} = 15,1 m \cdot s^{-1} \quad (11.21)$$

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{0,066}{0,0308} \right) \cdot \left(\frac{15,1 \cdot 0,0308}{5,58 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,19^{0,4} = 2874,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_{kp}}} = \frac{0,85 \cdot 136,2}{1 + \frac{136,2}{2874,5}} = 110,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11.22)$$

Součinitel tepelné efektivity

$$\psi = 0,85$$

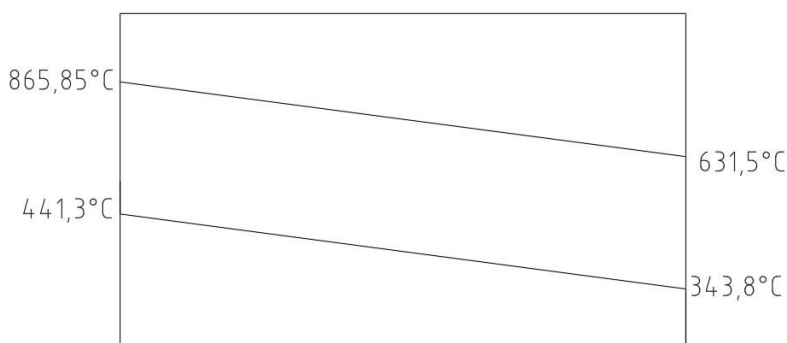
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (11.23)$$

$$\Delta t_1 = 865,85 - 441,3 = 424,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.24)$$

$$\Delta t_2 = 631,5 - 343,8 = 287,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.25)$$

$$\Delta t = \frac{424,5 - 287,7}{\ln \frac{424,5}{287,7}} = 351,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 11.3 Teplotní spád P2

Plocha přehříváku PII

$$S_{PII} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_f = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,98 \cdot 57 \cdot 18 = 242,4 \text{ m}^2 \quad (11.26)$$

Tepelný výkon přijatý přehřívákem PII

$$Q_{PII} = k \cdot \Delta t \cdot S = 110,5 \cdot 351,7 \cdot 242,4 = 9416,9 \text{ kW} \quad (11.27)$$

Tepelný výkon na straně pracovního média

$$Q_{P2} = 9243,85 \text{ kW}$$

Odchylka tepla přijatého spaliny a tepla odvedeného parou

$$x = \frac{Q_{P2} - Q_{PII}}{Q_{P2}} \cdot 100 = \frac{9243,85 - 9416,9}{9243,85} \cdot 100 = -1,8\% \quad (11.28)$$

Odchylka splňuje požadavek velikosti do 2%

11.4 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (11.29)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 6,8}{252,2} = 0,1077 \text{ m} \quad (11.30)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot (D + l_e) \cdot n_{tr} = 2 \cdot 5,13 \cdot 216 + 2 \cdot (0,038 + 1,98) \cdot 57 = 252,2 \text{ m} \quad (11.31)$$

Světlý průřez

$$F = a \cdot b - n_{tr} \cdot l_e \cdot D = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 1,98 \cdot 0,038 = 6,8 \text{ m}^2 \quad (11.32)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0912}{1,077} \cdot \left(\frac{16,8 \cdot 1,077}{1,22 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,636^{0,4} = 35,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (11.33)$$

Absolutní střední teplota spalin

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 748,7 + 273,15 = 1021,8 \text{ K} \quad (11.34)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{vyp} + \Delta t + 273,15 = 318,1 + 25 + 273,15 = 616,3 \text{ K} \quad (11.35)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,151 \cdot 1021,8^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{616,3}{1021,8} \right)}{1 - \frac{616,3}{1021,8}} = 17,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11.36)$$

Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal} = 1 \cdot 35,4 + 17,4 = 52,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11.37)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0,85 \cdot 52,8 = 44,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11.38)$$

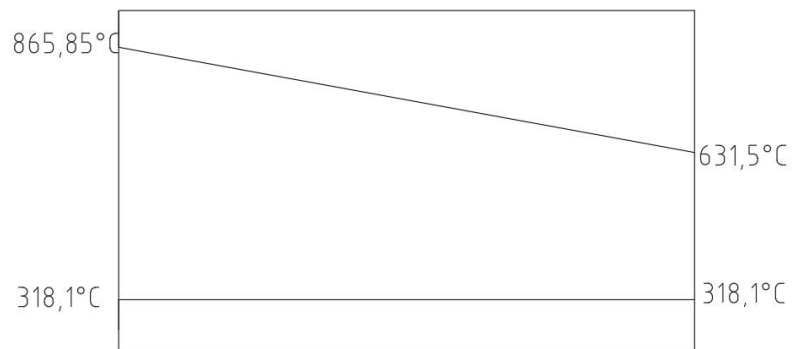
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (11.39)$$

$$\Delta t_1 = 865,85 - 318,1 = 547,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.40)$$

$$\Delta t_2 = 631,5 - 318,1 = 313,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11.41)$$

$$\Delta t = \frac{547,7 - 313,4}{\ln \frac{547,7}{313,4}} = 419,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 11.4 Teplotní spád mem. stěna

Plocha membránové stěny

$$S_{ms2} = 2 \cdot (l_o + l_s) \cdot (a + b) = 2 \cdot (0,9 + 1,53) \cdot (5,13 \cdot 2,16) = 35,4 \text{ m}^2 \quad (11.42)$$

Tepelný výkon přijatý membránovou stěnou

$$Q_{ms2} = k \cdot \Delta t \cdot S_{ms2} = 44,9 \cdot 419,7 \cdot 35,4 = 668,4 \text{ kW} \quad (11.43)$$

11.5 Tepelná bilance

Celkový výkon přijatý v oblasti přehříváku PII

$$Q_{c2} = Q_{PII} + Q_{ms2} = 9416,9 + 668,4 = 10085,3 \text{ kW} \quad (11.44)$$

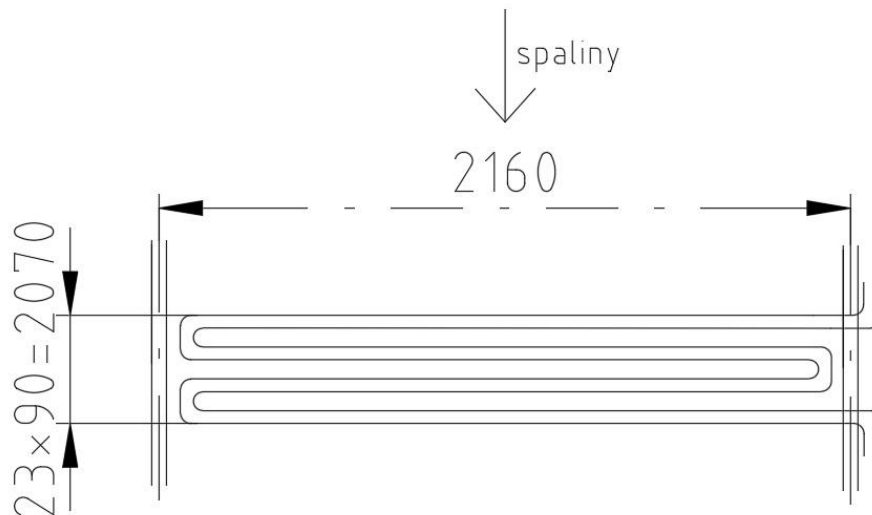
Entalpie spalin na konci PII

$$i_{2o} = 12505,97 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_{2o} = 631,7 \text{ } ^\circ\text{C}$

12 Přehřívák PI

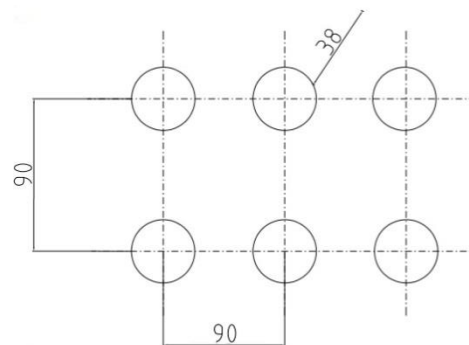
Přehřívák PI je posledním přehřívákem na cestě spaliny. Nachází se v druhém tahu za přehřívákem PII. Jedná se o protiproudý, příčně obtékaný svazek, tvořený hladkými trubkami. V jeho oblasti pokračuje membránová stěna, která je obtékána podélně.



Obrázek 12.1 Náčrt přehříváku I

Tabulka 12.1 Parametry přehříváku P1

	Značka	Rozměr
Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,0036 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0308 m
Příčná rozteč	s ₁	0,09 m
Podélná rozteč	s ₂	0,09 m
Efektivní délka trubek	l _e	1,98 m
Počet trubek v řadě	n _{tr}	57
Počet řad	n _r	24



Obrázek 12.2 Uspořádání trubek P1

Teplota spaliny na vstupu

$$t_{li} = 631,5^{\circ}\text{C}$$

Předpokladaná teplota spaliny na konci

$$t_{lo} = 486,4^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spaliny

$$t_{st} = \frac{t_{li} + t_{lo}}{2} = \frac{631,5 + 486,4}{2} = 559,0^{\circ}\text{C} \quad (12.1)$$

Teplota páry na vstupu

$$t_{pli} = 318,1^{\circ}\text{C}$$

Teplota páry na výstupu

$$t_{pio} = 366,6^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota páry

$$t_{st} = \frac{t_{pli} + t_{pio}}{2} = \frac{318,1 + 366,6}{2} = 342,4^{\circ}\text{C} \quad (12.2)$$

Průtočná plocha spalin

$$S_p = a \cdot b - n \cdot D \cdot l_e = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 0,038 \cdot 1,98 = 6,8 \text{ m}^2 \quad (12.3)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{6,8} \cdot \frac{273,15 + 559}{273,15} = 13,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.4)$$

12.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \left(\frac{\lambda}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (12.5)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

$$C_z = 1$$

$$z_2 > 10$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,37 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,37}{2} \right)^3 \right]} = 1,022 \quad (12.6)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (12.7)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (12.8)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,0744 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 8,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,654$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,022 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,0744}{0,038} \right) \cdot \left(\frac{13,7 \cdot 0,038}{8,78 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,654^{0,33} = 98,86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

12.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (12.9)$$

Absolutní střední teplota spalín

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 559 + 273,15 = 832,2 \text{ K} \quad (12.10)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{pst} + \Delta t + 273,15 = 342,4 + 25 + 273,15 = 640,5 \text{ K} \quad (12.11)$$

Stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,210 \text{ m} \quad (12.12)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (12.13)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 0,210}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{832,2}{1000} \right) \cdot 0,287 = 8,7$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = 8,7 \cdot 0,1 \cdot 0,21 = 0,182 \quad (12.14)$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,182} = 0,167 \quad (12.15)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,167 \cdot 832,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{640,5}{832,2} \right)}{1 - \frac{640,5}{832,2}} = 13,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Zvětšení součinitele přestupu tepla sáláním volných proctor

Teplota spalin před svazkem

$$T_o = 631,5 + 273,15 = 904,7 \text{ K}$$

Koeficient pro plyn $A = 0,3$ viz [1]

Výška volného prostoru $l_o = 0,9 \text{ m}$

Výška svazku $l_s = 2,07 \text{ m}$

$$k_o = 1,31$$

$$\alpha'_{sal} = \alpha_{sal} \cdot k_o = 13 \cdot 1,31 = 17,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.16)$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny

$$\alpha_c = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha'_{sal}) = 1 \cdot (98,9 + 17,1) = 115,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.17)$$

12.3 Součinitel přestupu tepla konvekci na straně páry

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (12.18)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,074 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 1,43$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = D - 2 \cdot t = (38 - 2 \cdot 3,6) \cdot 10^{-3} = 0,308 \text{ m} \quad (12.19)$$

Průtočný průřez trubek

$$S_{tr} = n_{tr} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 57 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} = 0,0424 \text{ m}^2 \quad (12.20)$$

Měrný objem páry

$$\nu = 0,019 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Průtočná rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp1} \cdot v}{S_{tr}} = \frac{25,87 \cdot 0,019}{0,0424} = 11,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.21)$$

Kontrola rychlosti páry výpočtem hmotové rychlosti

$$w \cdot \rho = 11,6 \cdot 53 = 614,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s} \quad (12.22)$$

ρ ... hustota páry

Hmotová rychlost páry je v doporučeném rozmezí 500-1000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$ dle[1]

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{0,074}{0,0308} \right) \cdot \left(\frac{11,6 \cdot 0,0308}{4,1 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,43^{0,4} = 3598,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_{kp}}} = \frac{0,85 \cdot 115,9}{1 + \frac{115,9}{3598,5}} = 95,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.23)$$

Součinitel tepelné efektivity

$$\psi = 0,85$$

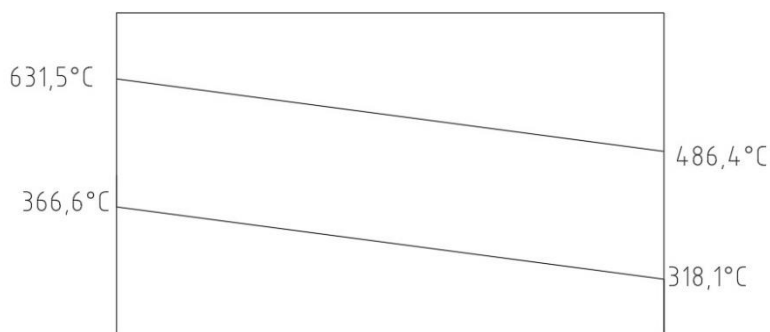
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (12.24)$$

$$\Delta t_1 = 631,5 - 366,6 = 264,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.25)$$

$$\Delta t_2 = 486,4 - 318,1 = 168,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.26)$$

$$\Delta t = \frac{264,9 - 168,3}{\ln \frac{264,9}{168,3}} = 213,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 12.3 Teplotní spád P1

Plocha přehříváku PI

$$S_{PI} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{\bar{r}} = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,98 \cdot 57 \cdot 24 = 323,2 m^2 \quad (12.27)$$

Tepelný výkon přijatý přehřívákem PI

$$Q_{PI} = k \cdot \Delta t \cdot S = 95,5 \cdot 213 \cdot 323,2 = 6573,9 kW \quad (12.28)$$

Tepelný výkon na straně pracovního media

$$Q_{p1} = 6618,7 kW$$

Odchylka tepla přijatého spaliny a tepla odvedeného parou

$$x = \frac{Q_{p1} - Q_{PI}}{Q_{p1}} \cdot 100 = \frac{6618,7 - 6573,9}{6618,7} \cdot 100 = 0,7\% \quad (12.29)$$

Odchylka splňuje požadavek velikosti do 2%

12.4 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (12.30)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 6,8}{252,2} = 1,077 m \quad (12.31)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot (D + l_e) \cdot n_{tr} = 2 \cdot 5,1 \cdot 2,16 + 2 \cdot (0,038 + 1,98) \cdot 57 = 252,2 m \quad (12.32)$$

Světlý průřez

$$F = a \cdot b - n_{tr} \cdot l_e \cdot D = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 1,98 \cdot 0,038 = 6,8 m^2 \quad (12.33)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0744}{1,077} \cdot \left(\frac{13,7 \cdot 1,077}{8,78 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,654^{0,4} = 32,3 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (12.34)$$

Absolutní střední teplota spalin

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 631,5 + 273,15 = 904,7 \text{ K} \quad (12.35)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{vyp} + \Delta t + 273,15 = 318,1 + 25 + 273,15 = 616,3 \text{ K} \quad (12.36)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,166 \cdot 904,7^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{616,3}{904,7} \right)}{1 - \frac{616,3}{904,7}} = 14,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal} = 1 \cdot 32,3 + 14,9 = 47,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.37)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0,85 \cdot 47,1 = 40,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (12.38)$$

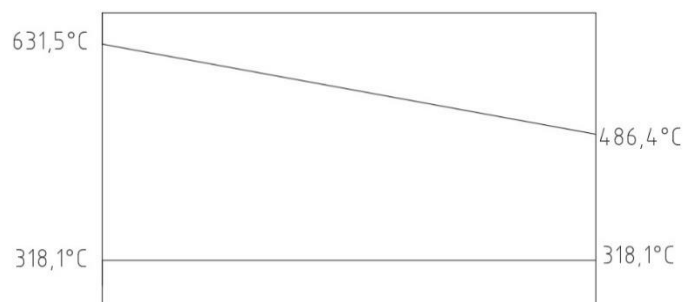
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (12.39)$$

$$\Delta t_1 = 631,5 - 318,1 = 313,4^\circ \text{C} \quad (12.40)$$

$$\Delta t_2 = 486,4 - 318,1 = 168,3^\circ \text{C} \quad (12.41)$$

$$\Delta t = \frac{313,4 - 168,3}{\ln \frac{313,4}{168,3}} = 233,4^\circ \text{C}$$



Obrázek 12.4 Teplotní spád mem. stěna

Plocha membránové stěny

$$S_{ms1} = 2 \cdot (l_o + l_s) \cdot (a + b) = 2 \cdot (0,85 + 2,07) \cdot (5,13 \cdot 2,16) = 43,3 \text{ m}^2 \quad (12.42)$$

Tepelný výkon přijatý membránovou stěnou

$$Q_{ms1} = k \cdot \Delta t \cdot S_{ms1} = 40,1 \cdot 233,4 \cdot 43,3 = 405,1 \text{ kW} \quad (12.43)$$

12.5 Tepelná bilance

Celkový výkon přijatý v oblasti přehříváku PI

$$Q_{c1} = Q_{PI} + Q_{ms1} = 6573,9 + 405,1 = 6979,0 \text{ kW} \quad (12.44)$$

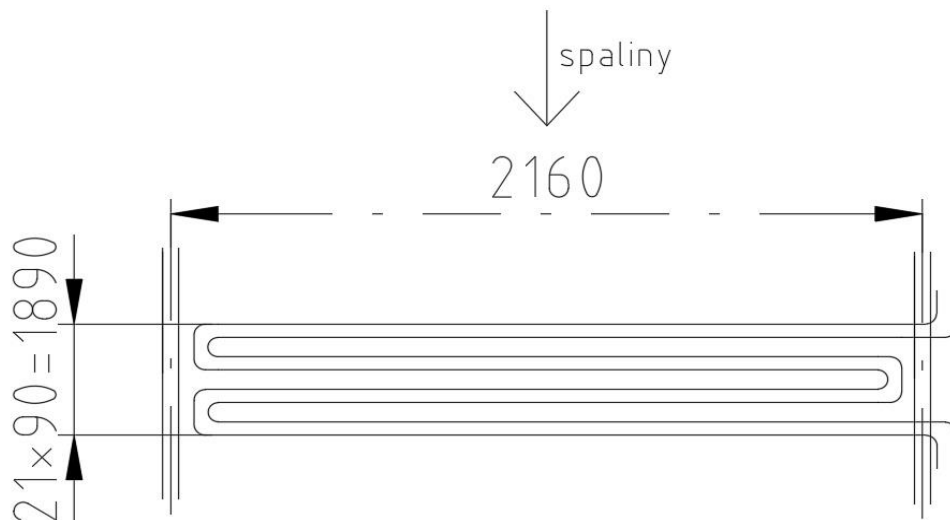
Entalpie spalin na konci PI

$$i_{1o} = 9241,2 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_{1o} = 486,4^\circ\text{C}$

13 Ekonomizér II

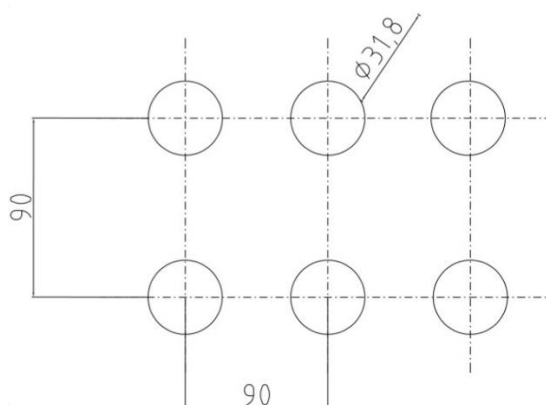
Ekonomizér II se nachází na konci druhého tahu. Jedná se o protiproudý, příčně obtékáný svazek z hladkých trubek uspořádaných za sebou. Nedohřev vody na výstupu z ekonomizéru je 51,1°C. V jeho oblasti pokračuje membránová stěna, která je obtékána podélně a sahá po konec druhého tahu.



Obrázek 13.1 Náčrt ekonomizéru 2

Tabulka 13.1 Parametry Ekonomizéru II

	Značka	Rozměr
Vnější průměr trubky	D	0,0318 m
Tloušťka stěny	t	0,0036 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0246 m
Příčná rozteč	s ₁	0,09 m
Podélná rozteč	s ₂	0,09 m
Efektivní délka trubek	l _e	1,98 m
Počet trubek v řadě	n _{tr}	57
Počet řad	n _r	22



Obrázek 13.2 Uspořádání trubek EKOII

Teplota spalin na vstupu

$$t_i = 486,4^{\circ}\text{C}$$

Předpokladaná teplota spalin na konci

$$t_o = 380,9^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_i + t_o}{2} = \frac{486,4 + 380,9}{2} = 433,6^{\circ}\text{C} \quad (13.1)$$

Teplota vody na vstupu

$$t_{wi} = 229^{\circ}\text{C}$$

Teplota vody na výstupu

$$t_{wo} = 267^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota vody

$$t_{wst} = \frac{t_{wi} + t_{po}}{2} = \frac{229 + 267}{2} = 248^{\circ}\text{C} \quad (13.2)$$

Průtočná plocha spalin

$$S_p = a \cdot b - n \cdot D \cdot l_e = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 0,0318 \cdot 1,98 = 7,5 \text{ m}^2 \quad (13.3)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,626}{7,5} \cdot \frac{273,15 + 433,6}{273,15} = 10,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (13.4)$$

Průtočný průřez pro vodu

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0246^2}{4} \cdot 57 = 0,0271 \text{ m}^2 \quad (13.5)$$

Rychlost vody

$$w_w = \frac{M_{pp1} \cdot v}{F} = \frac{25,87 \cdot 0,0012}{0,0271} = 1,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (13.6)$$

v... měrný objem 0,0012 m³/kg

Rychlost vody splňuje doporučený limit $w_w = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

13.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \left(\frac{\lambda}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{v} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (13.7)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

$$C_z = 1$$

$z_2 > 10$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]} = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,83 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,83}{2} \right)^3 \right]} = 1,235 \quad (13.8)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,09}{0,0318} = 2,83 \quad (13.9)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,0318} = 2,83 \quad (13.10)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,062 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,67$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,235 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,062}{0,0318} \right) \cdot \left(\frac{10,6 \cdot 0,0318}{6,4 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,67^{0,33} = 108,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

13.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (13.11)$$

Absolutní střední teplota spalin

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 433,6 + 273,15 = 706,8 \text{ K} \quad (13.12)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{pst} + \Delta t + 273,15 = 248 + 25 + 273,15 = 546,2 \text{ K} \quad (13.13)$$

Stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,263 \text{ m} \quad (13.14)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (13.15)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 0,263}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{706,8}{1000} \right) \cdot 0,287 = 8,2$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = 8,2 \cdot 0,1 \cdot 0,236 = 0,217 \quad (13.16)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,217} = 0,195 \quad (13.17)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,195 \cdot 706,8^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{546,2}{706,8} \right)}{1 - \frac{546,2}{706,8}} = 9,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Zvětšení součinitele přestupu tepla sáláním volných proctor

Teplota spalin před svazkem

$$T_o = 486,4 + 273,15 = 759,5 \text{ K}$$

Koeficient pro plyn $A = 0,3$ viz [1]

Výška volného prostoru $l_o = 0,8 \text{ m}$

Výška svazku $l_s = 1,89 \text{ m}$

$$k_o = 1,3$$

$$\alpha'_{sal} = \alpha_{sal} \cdot k_o = 9,1 \cdot 1,3 = 12,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13.18)$$

Celkový součinitel přestupu tepla pro spaliny

$$\alpha_c = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha'_{sal}) = 1 \cdot (108,9 + 12,2) = 121,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13.19)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0,85 \cdot 121,1 = 102,9 \quad (13.20)$$

Součinitel tepelné efektivity

$$\psi = 0,85$$

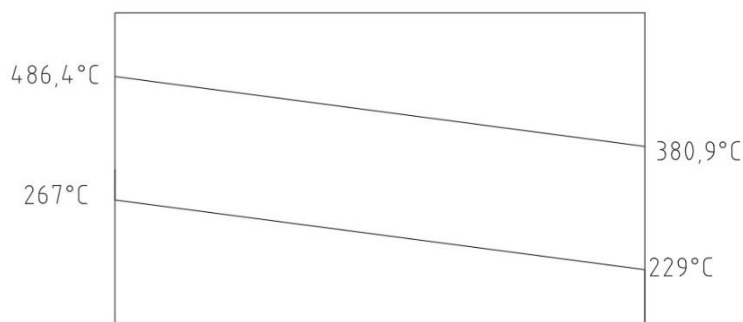
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (13.21)$$

$$\Delta t_1 = 486,4 - 267 = 219,4^\circ \text{C} \quad (13.22)$$

$$\Delta t_2 = 380,9 - 229 = 151,9^\circ \text{C} \quad (13.23)$$

$$\Delta t = \frac{219,4 - 151,9}{\ln \frac{219,4}{151,9}} = 183,6^\circ\text{C}$$



Obrázek 13.3 Teplotní spád EKOII

Plocha Ekonomizéru II

$$S_{EII} = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_f = \pi \cdot 0,0318 \cdot 1,98 \cdot 57 \cdot 22 = 247,9 \text{ m}^2 \quad (13.24)$$

Tepelný výkon přijatý Ekonomizérem II

$$Q_{EII} = k \cdot \Delta t \cdot S = 102,9 \cdot 183,6 \cdot 247,9 = 4684,6 \text{ W} \quad (13.25)$$

Tepelný výkon na straně pracovního média

$$Q_{E2} = 4685,1 \text{ kW}$$

Odchylka tepla přijatého spaliny a tepla odvedeného parou

$$x = \frac{Q_{EII} - Q_{E2}}{Q_{E2}} \cdot 100 = \frac{4685,1 - 4684,6}{4685,1} \cdot 100 = 0,01\% \quad (13.26)$$

Odchylka splňuje požadavek velikosti do 2%

13.3 Membránová stěna

Součinitel přestupu tepla konvekci

$$\alpha_{kp} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (13.27)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 7,5}{251,5} = 0,119 \text{ m} \quad (13.28)$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot (D + l_e) \cdot n_{tr} = 2 \cdot 5,13 \cdot 2,16 + 2 \cdot (0,0318 + 1,98) \cdot 57 = 251,5 \text{ m} \quad (13.29)$$

Světlý průřez

$$F = a \cdot b - n_{tr} \cdot l_e \cdot D = 5,13 \cdot 2,16 - 57 \cdot 1,98 \cdot 0,0318 = 67,5 \text{ m}^2 \quad (13.30)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,062}{0,119} \cdot \left(\frac{10,6 \cdot 0,119}{6,4 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,67^{0,4} = 27,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (13.31)$$

Absolutní střední teplota spalin

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 433,7 + 273,15 = 706,9 \text{ K} \quad (13.32)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

$$T_z = t_{vyp} + \Delta t + 273,15 = 318,1 + 25 + 273,15 = 616,3 \text{ K} \quad (13.33)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,195 \cdot 694,9^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{616,3}{706,9} \right)}{1 - \frac{616,3}{706,9}} = 10,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla a tepelný výkon

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal} = 1 \cdot 27,3 + 10,7 = 38,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13.34)$$

$$k = \psi \cdot \alpha_c = 0,85 \cdot 38,1 = 32,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (13.35)$$

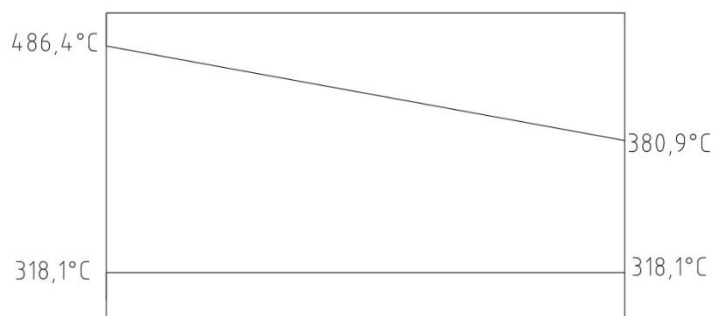
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (13.36)$$

$$\Delta t_1 = 486,4 - 318,1 = 168,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13.37)$$

$$\Delta t_2 = 380,9 - 318,1 = 62,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13.38)$$

$$\Delta t = \frac{168,3 - 62,8}{\ln \frac{168,3}{62,8}} = 107,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obrázek 13.4 Teplotní spád mem. stěna

Plocha membránové stěny

$$S_{mse} = 2 \cdot (l_o + l_s) \cdot (a + b) = 2 \cdot (0,65 + 2,07) \cdot (5,13 \cdot 2,16) = 52,1 \text{ m}^2 \quad (13.39)$$

Tepelný výkon přijatý membránovou stěnou

$$Q_{mse} = k \cdot \Delta t \cdot S_{mse} = 32,4 \cdot 107 \cdot 52,1 = 180,5 \text{ kW} \quad (13.40)$$

13.4 Tepelná bilance

Celkový výkon přijatý v oblasti Ekonomizéru II

$$Q_c = Q_{EII} + Q_{mse} = 4684,6 + 180,5 = 4865,1 \text{ kW} \quad (13.41)$$

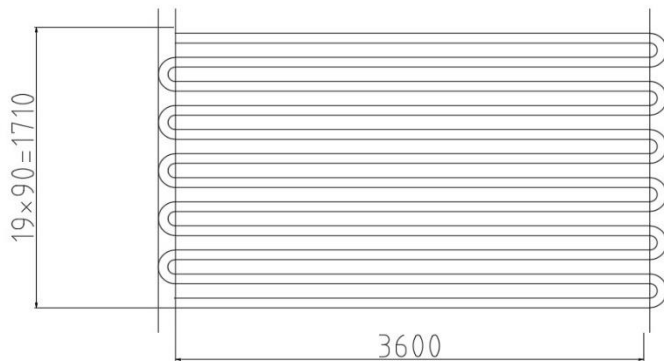
Entalpie spalin na konci EII

$$i_{E2o} = 7268,7 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

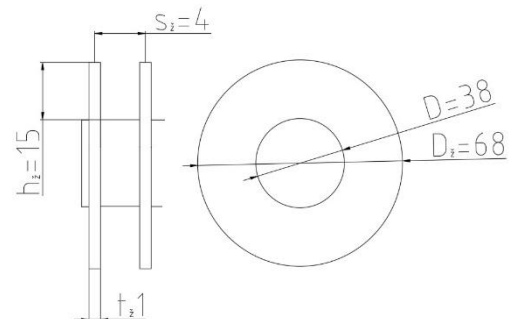
Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_{E2o} = 380,9 \text{ } ^\circ\text{C}$

14 Ekonomizér I

Ekonomizér I je umístěn v třetím a posledním tahu kotle. Jedná se o protiproudý výměník s uspořádáním žebrovaných trubek za sebou. Toto uspořádání bylo voleno z důvodu snížení tlakové ztráty.



Obrázek 14.1 Náčrt Ekonomizéru 1



Obrázek 14.2 Detail rozměrů trubek

Tabulka 14.1 Parametry Ekonomizéru 1

	Značka	Rozměr
Šířka tahu	a	3,76 m
Šířka tahu	b	3,87 m
Vnější průměr trubky	D	0,038 m
Tloušťka stěny	t	0,0036 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0308 m
Tloušťka žebra	t _ž	0,001 m
Výška žebra	h _ž	0,015 m
Žeber na metr délky	n _ž	250
Průměr žebra	D _ž	0,0680
Příčná rozteč	s ₁	0,08 m
Podélná rozteč	s ₂	0,09 m
Efektivní délka trubek	l _e	3,6 m
Počet trubek v řadě	n _{tr}	46
Počet řad	n _ř	20

Teplota spalin na vstupu

$$t_i = 380,9^{\circ}\text{C}$$

Předpokladaná teplota spalin na konci

$$t_o = 164,6^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{st} = \frac{t_i + t_o}{2} = \frac{380,9 + 164,6}{2} = 272,75^{\circ}\text{C} \quad (14.1)$$

Teplota vody na vstupu

$$t_{wi} = 145^{\circ}\text{C}$$

Teplota vody na výstupu

$$t_{wo} = 229^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota vody

$$t_{wst} = \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} = \frac{145 + 229}{2} = 187^{\circ}\text{C} \quad (14.2)$$

Průtočná plocha spalin

$$S_p = a \cdot b - n_{tr} \cdot l_{str} \cdot D - 2 \cdot l_{str} \cdot h_z \cdot t_z \cdot n_z \cdot n_{tr} = 3,76 \cdot 3,87 - 46 \cdot 0,038 \cdot 3,6 - 3,6 \cdot 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 250 \cdot 46 = 6,27 \text{ m}^2 \quad (14.3)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{6,27} \cdot \frac{273,15 + 272,75}{273,15} = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14.4)$$

Průtočný průřez pro vodu

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 46 = 0,0343 \text{ m}^2 \quad (14.5)$$

Rychlost vody

$$w_w = \frac{M_{pp1} \cdot v}{F} = \frac{25,87 \cdot 0,0011}{0,0343} = 0,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14.6)$$

v... měrný objem 0,0011 m³/kg

Rychlost vody splňuje doporučený limit $w_w = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

14.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Trubky s kruhovými žebry uspořádané výstřídane

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_z \cdot C_s \left(\frac{\lambda}{s_z} \right) \cdot \left(\frac{D}{s_z} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{s_z} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot s_z}{v} \right)^{0,72} \quad (14.7)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

$$C_z = 1 \text{ pro } z > 4$$

Korekční součinitel na uspořádání trubek ve svazku

$$C_s = 1 \text{ pro } \sigma_2 > 2$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,038} = 2,1 \quad (14.8)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (14.9)$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda = 0,047 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,047}{0,004} \right) \cdot \left(\frac{0,038}{0,004} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{0,004} \right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{9,8 \cdot 0,004}{4,1 \cdot 10^{-5}} \right) = 42,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

14.2 Redukovaný součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sr} = \left[\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right] \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k} \quad (14.10)$$

Součinitel zanešení trubek

$$\varepsilon = 0,0043$$

Součinitel rozšíření žebra

$$\mu = 1$$

Součinitel charakterizující nerovnoměrné rozdělení α_k po povrchu žebra

$$\psi_z = 0,85$$

Součinitel tepelné vodivosti žebířů

$$\lambda_z = 42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel β

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_k}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 42,2}{0,001 \cdot 42 \cdot (1 + 0,0043 \cdot 0,85 \cdot 42,2)}} = 38,5 \quad (14.11)$$

Součinitel efektivnosti žebra

$$E = f\left(\beta \cdot h_z; \frac{D_z}{D}\right) \quad (14.12)$$

$$\beta \cdot h_z = 38,5 \cdot 0,015 = 0,57 \quad (14.13)$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,068}{0,038} = 1,79 \quad (14.14)$$

$$E = 0,9 \text{ určeno graficky dle [1]}$$

Podíl výhřevných ploch žebér a celkové plochy na straně spalin

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{s_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,068}{0,038}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,068}{0,038}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,004}{0,038} - \frac{0,001}{0,038}\right)} = 0,933 \quad (14.15)$$

Podíl volných částí trubky a celkové plochy ze strany spalin

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,933 = 0,067 \quad (14.16)$$

$$\alpha_{sr} = [0,933 \cdot 0,9 \cdot 1 + 0,067] \cdot \frac{0,85 \cdot 42,2}{1 + 0,001 \cdot 0,85 \cdot 42,2} = 33,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sr}}} = 33,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (14.17)$$

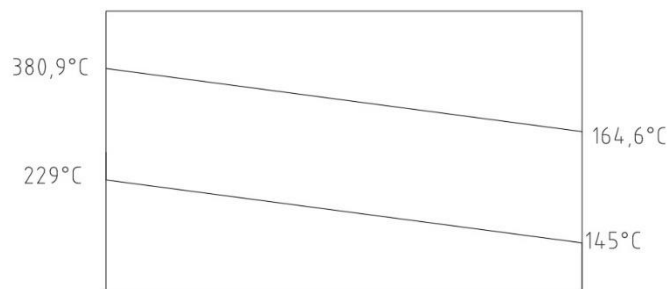
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (14.18)$$

$$\Delta t_1 = t_i - t_{wo} = 380,9 - 229 = 151,9^\circ\text{C} \quad (14.19)$$

$$\Delta t_2 = t_o - t_{wi} = 164,6 - 145 = 19,6^\circ\text{C} \quad (14.20)$$

$$\Delta t = \frac{151,9 - 19,6}{\ln \frac{151,9}{19,6}} = 64,6^\circ\text{C}$$



Obrázek 14.3 Teplotní spád EKOI

Plocha jednoho žebra

$$S_{1z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (D_z^2 - D^2)}{4} + \pi \cdot D_z \cdot t_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot (0,068^2 - 0,038^2)}{4} + \pi \cdot 0,068 \cdot 0,001 \quad (14.21)$$

$$S_{1z} = 0,0052 \text{ m}^2$$

Plocha trubky na 1 metr délky

$$S_{1m} = \pi \cdot D \cdot (1 - n_z \cdot t_z) + n_z \cdot S_{1z} = \pi \cdot 0,038 \cdot (1 - 250 \cdot 0,001) + 250 \cdot 0,0052 = 1,34 \text{ m}^2 \quad (14.22)$$

Plocha Ekonomizéru I

$$S_{EI} = S_{lm} \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_f = 1,34 \cdot 3,6 \cdot 46 \cdot 20 = 4430,3 \text{ m}^2 \quad (14.23)$$

14.3 Tepelná balance

Tepelný výkon přijatý Ekonomizérem I

$$Q_{EI} = k \cdot \Delta t \cdot S = 33 \cdot 64,6 \cdot 4430,3 = 9451,6 \text{ kW} \quad (14.24)$$

Tepelný výkon na straně pracovního média

$$Q_{E1} = 9566,7 \text{ kW}$$

Odchylka tepla přijatého spaliny a tepla odvedeného pracovním médiem

$$x = \frac{Q_{EI} - Q_{E1}}{Q_{E1}} \cdot 100 = \frac{9566,7 - 9451,6}{9566,7} \cdot 100 = 1,2\% \quad (14.25)$$

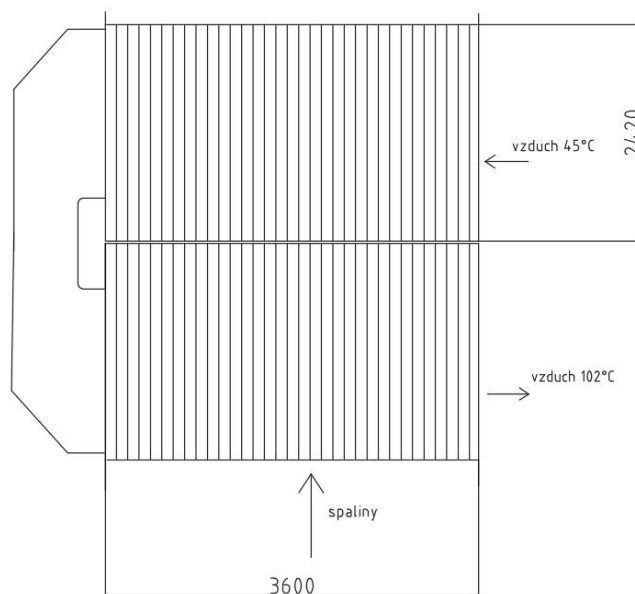
Entalpie odcházejících spalin z EI

$$i_{E1o} = 3089,4 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_{E1o} = 164,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

15 Ohřívák vzduchu (LUVO)

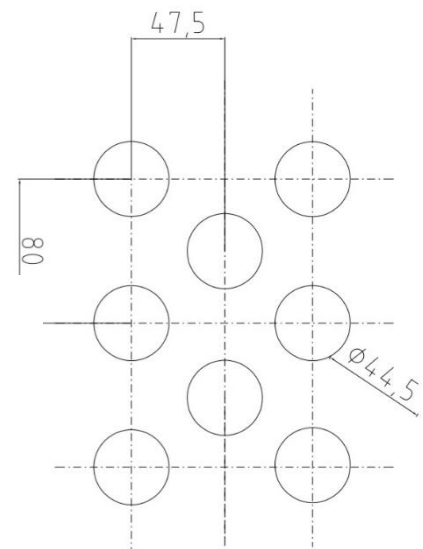
Ohřívák vzduchu se nachází ve třetím tahu kotle a je poslední teplosměnnou plochou ve směru spalín. Jedná se o trubkový ohřívák, ve kterém proudí spaliny trubkami. Trubky, které jsou ve vystřídáném pořadí, příčně obtéká vzduch. Ohřívák je rozdělen na dva propojené bloky a zapojení je realizováno jako křížové proudění.



Obrázek 15.1 Náčrt LUVO

Tabulka 15.1 Parametry pro LUVO

	Značka	Rozměr
Vnější průměr trubky	D	0,0445 m
Tloušťka stěny	t	0,0015 m
Vnitřní průměr trubky	d	0,0415 m
Příčná rozteč	s ₁	0,08 m
Podélná rozteč	s ₂	0,0475 m
Délka trubek	l _e	2,42 m
Počet trubek v řadě	n _{tr}	46
Počet řad	n _ř	82



Obrázek 15.2 Uspořádání trubek LUVO

Teplota spalín na vstupu

$$t_i = 164,6^\circ\text{C}$$

Předpokladaná teplota spalín na konci

$$t_o = 95^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalín

$$t_{st} = \frac{t_i + t_o}{2} = \frac{164,6 + 95}{2} = 129,8^\circ\text{C} \quad (15.1)$$

Teplota vzduchu na vstupu

$$t_{vi} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Na teplotu 45°C je vzduch ohříván pomocí kaloriféru

Teplota vzduchu na výstupu

$$t_{vo} = 102 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{vst} = \frac{t_{vi} + t_{vo}}{2} = \frac{102 + 45}{2} = 73,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (15.2)$$

Průtočná plocha spalín

$$S_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{\bar{r}} = \frac{\pi \cdot 0,0415^2}{4} \cdot 46 \cdot 82 = 5,1 \text{ m}^2 \quad (15.3)$$

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{O_{SVr}^a \cdot M_{pv}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{st}}{273,15} = \frac{13,542 \cdot 2,26}{5,1} \cdot \frac{273,15 + 129,8}{273,15} = 8,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15.4)$$

Průtočný průřez pro vzduch

$$F = a \cdot l_e - D \cdot l_e \cdot n_{tr} = 3,75 \text{ m}^2 \quad (15.5)$$

Rychlost vzduchu

$$w_v = \frac{M_{pv} \cdot O_{VV} \cdot \alpha}{F} \cdot \left(1 + \frac{t_{vst}}{273}\right) = \frac{2,242 \cdot 9,785 \cdot 1,05}{3,75} \cdot \left(1 + \frac{73,5}{273}\right) = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15.6)$$

15.1 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

Jedná se o podélné proudění uvnitř trubek

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d}\right) \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\nu}\right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (15.7)$$

Tepelná vodivost spalín

$$\lambda = 0,0345 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalín

$$\nu = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,726$$

Vnitřní průměr trubek

$$d = D - 2 \cdot t = 0,0445 - 2 \cdot 0,0015 = 0,0415 \text{ m} \quad (15.8)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \left(\frac{0,0345}{0,0415}\right) \cdot \left(\frac{8,9 \cdot 0,0415}{2,4 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,8} \cdot 0,726^{0,4} = 36,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (15.9)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s}\right)}{1 - \frac{T_z}{T_s}} \quad (15.10)$$

Absolutní střední teplota spalín

$$T_s = t_{st} + 273,15 = 129,8 + 273,15 = 403,0 \text{ K} \quad (15.11)$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu

Teplota vnějšího nánosu zaneseného povrchu se počítá jako aritmetický průměr středních teplot spalín a vzduchu

$$T_z = \frac{t_{vst} + t_{st}}{2} + \Delta t + 273,15 = \frac{73,5 + 129,8}{2} + 25 + 273,15 = 374,8 \text{ K} \quad (15.12)$$

Stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,0475}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,058 \text{ m} \quad (15.13)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_s}{1000} \right) \cdot r_s \quad (15.14)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,1971}{3,16 \cdot \sqrt{0,0287 \cdot 0,058}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{403}{1000} \right) \cdot 0,287 = 20,5$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = 20,5 \cdot 0,1 \cdot 0,058 = 0,12 \quad (15.15)$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,12} = 0,11 \quad (15.16)$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,11 \cdot 403^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{374,8}{403}\right)}{1 - \frac{374,8}{403}} = 1,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový součinitel ze strany spalín

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal} = 1 \cdot 36,6 + 1,35 = 38,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (15.17)$$

15.2 Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu

Součinitel pro příčné proudění

$$\alpha_k = C_s \cdot C_z \cdot \left(\frac{\lambda}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_v \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (15.18)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

$$C_z = 1$$

$$n_f > 10$$

Oprava na uspořádání svazku podle poměrné příčné rozteče σ_1 a hodnoty φ_σ

$$C_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 \cdot 2,0^{0,5} = 0,39 \quad (15.19)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,0445} = 1,8 \quad (15.20)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0475}{0,0445} = 1,07 \quad (15.21)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 1,8^2 + 1,07^2} = 1,4 \quad (15.22)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,8 - 1}{1,4 - 1} = 2,0 \quad (15.23)$$

Tepelná vodivost vzduchu

$$\lambda = 0,0296 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,71$$

$$\alpha_v = 0,39 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,0296}{0,0445} \right) \cdot \left(\frac{7,8 \cdot 0,0445}{2,1 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,71^{0,33} = 79,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_c \cdot \alpha_v}{\alpha_c + \alpha_v} = 0,85 \cdot \frac{38,0 \cdot 79,7}{38,0 + 79,7} = 21,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (15.24)$$

Součinitel využití

$$\xi = 0,85$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (15.25)$$

Pro křížové proudění

$$\Delta t_k = \Delta t \cdot \psi \quad (15.26)$$

Součinitel ψ určujeme z nomogramu v závislosti na velikostech parametrů P a R

$$P = \frac{\tau_m}{t_i - t_{vi}} \quad (15.27)$$

$$R = \frac{\tau_v}{\tau_m} \quad (15.28)$$

τ_m ... menší rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem každého media

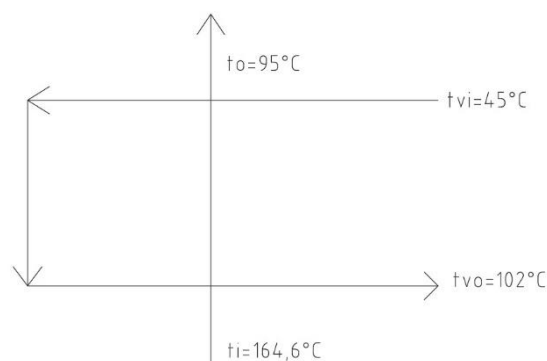
τ_v ... větší rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem každého media

$$\tau_m = t_{vo} - t_{vi} = 102 - 45 = 57^\circ\text{C} \quad (15.29)$$

$$\tau_v = t_i - t_o = 164,6 - 95 = 69,6^\circ\text{C} \quad (15.30)$$

$$P = \frac{57}{164,6 - 45} = 0,58$$

$$R = \frac{69,6}{57} = 1,22$$



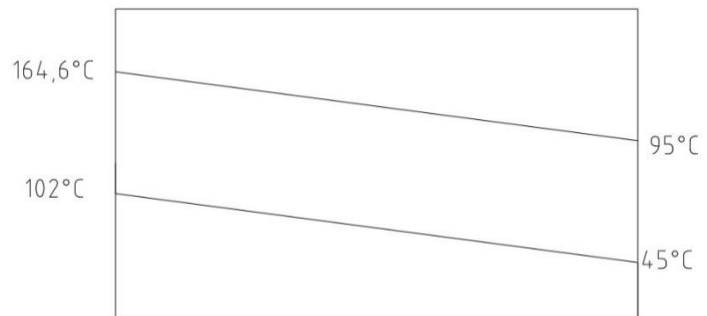
Obrázek 15.3 Křížové proudění schéma

$\psi = 0,965$ odečteno z grafu dle [1]

$$\Delta t_1 = t_i - t_{vo} = 164,6 - 102 = 62,6^\circ\text{C} \quad (15.31)$$

$$\Delta t_2 = t_o - t_{vi} = 95 - 45 = 50^\circ\text{C} \quad (15.32)$$

$$\Delta t = \frac{62,6 - 50}{\ln \frac{62,6}{50}} = 56,1^\circ\text{C}$$



Obrázek 15.4 Teplotní spád

$$\Delta t_k = 0,965 \cdot 56,1 = 54,9^\circ\text{C}$$

Plocha trubek ohříváku

$$S = \pi \cdot D_{stř} \cdot n_{tr} \cdot n_f \cdot l \cdot 2 = \pi \cdot 0,043 \cdot 46 \cdot 82 \cdot 2,42 \cdot 2 = 2479,2 \text{ m}^2 \quad (15.33)$$

Tepelný výkon přijatý ohřívákem vzduchu

$$Q_{OVZ} = k \cdot \Delta t_k \cdot S = 21,8 \cdot 54,9 \cdot 2479,2 = 2974,7 \text{ kW} \quad (15.34)$$

Výkon vypočten z entalpií spalin

$$Q_{LUVO} = 2983,8 \text{ kW}$$

15.3 Tepelná bilance

$$x = \frac{Q_{ovz} - Q_{LUVO}}{Q_{ovz}} \cdot 100 = \frac{2974,7 - 2983,8}{2974,7} \cdot 100 = -0,3\% \quad (15.35)$$

Entalpie odcházejících spalin z LUVO

$$i_o = 1770,5 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Této entalpii odpovídá teplota odchozích spalin $t_o = 95^\circ\text{C}$

16 Kontrola výkonu kotle

Tabulka 16.1 Výkon na straně média

Teplosměnná plocha	Výkon [kW]
Přehřívák P _{III}	8111,8
Přehřívák P _{II}	9243,9
Přehřívák P _I	6618,6
Výparník	35413,4
Ekonomizér E _{II}	8995,0
Ekonomizér E _I	966,7
Výrobní teplo páry Q_v	77949,4

Tabulka 16.2 Výkon odevzdáný plochám

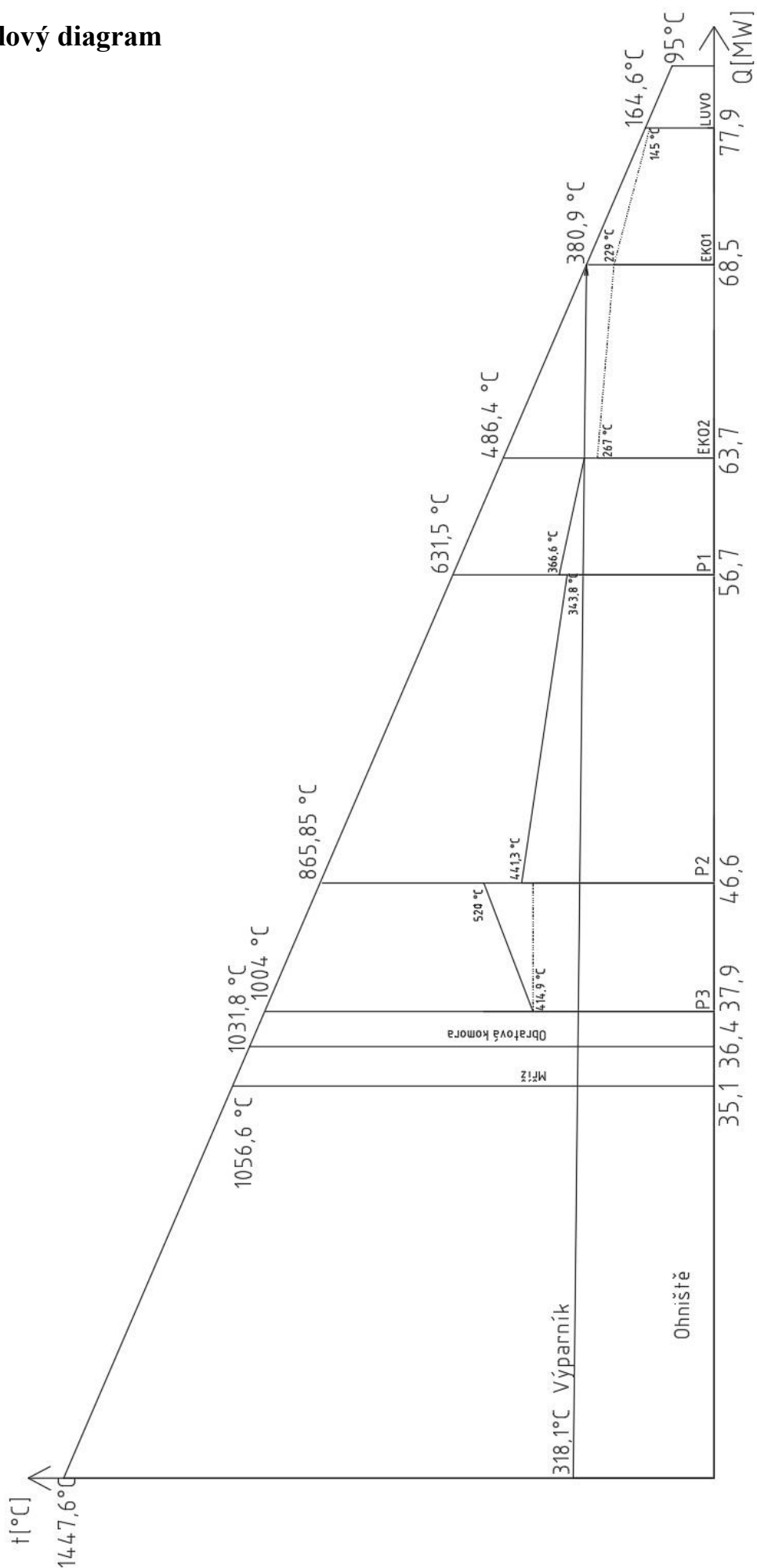
Oblast	Výkon [kW]
Výparník	35108,5
Mříž	1320,4
Obratová komora	1496,5
Přehřívák P _{III}	8719,5
Přehřívák P _{II}	10085,3
Přehřívák P _I	6979,0
Ekonomizér E _{II}	4865,1
Ekonomizér E _I	9451,6
Q celkové	78025,9

Odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{Q_v - Q}{Q_v} \cdot 100 = \frac{77947,4 - 78025,9}{78025,9} \cdot 100 = -0,1\% \quad (16.1)$$

Celková odchylka splňuje toleranci do 0,5 % dle [1]

17 Pilový diagram



Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést tepelný výpočet a základní rozměrový návrh kotle na spalování zemního plynu. Parametry kotle byly navrženy na parní výkon 100 t/h a teplotu přehřáté páry 520 °C a tlaku 10,5 MPa. Prvním krokem bylo provedení stechiometrických výpočtů, čímž bylo stanoveno potřebné množství vzduchu a množství vzniklých spalin. Po odborné konzultaci byla započítána recirkulace spalin o velikosti 20 %. Přebytek vzduchu byl u tohoto přetlakového kotle stanoven $\alpha=1,05$. Ze ztrát kotle byla nepřímou metodou vypočítána jeho účinnost 95,7 % a z celkového tepelného výkonu stanoveno množství spáleného paliva. Poté byl proveden geometrický návrh spalovací komory a tepelný výpočet ohniště, z něhož byla určena teplota na jeho konci.

Nejobsáhlejší část práce tvoří výpočet jednotlivých teplosměnných ploch, které jsou řazeny postupně ve směru proudění spalin. Jednotlivé výpočty jsou na konci ověřeny tepelnou bilancí, kde odchylka nepřesahuje hranici 2 %.

V závěru práce je ověřena odchylka tepelné bilance celého kotle, která činí 0,1 %, čímž splňuje toleranci do 0,5 %.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
a	m	Délkový rozměr spalínového kanálu
a_0	-	Stupeň černosti ohniště
a_{ns}	-	Stupeň černosti nesvítivé části plamene
a_{pl}	-	Stupeň černosti plamene
a_{sv}	-	Stupeň černosti svítivé části plamene
b	m	Délkový rozměr spalínového kanálu
Bo	-	Boltzmanovo číslo
C_s	-	Opravný součinitel na uspořádání svazku
C_z	-	Opravný součinitel na počet řad svazku
D	m, mm	Vnější průměr trubky, žebra
d	m, mm	Vnitřní průměr trubky
d_e	m	Ekvivalentní průměr
E	-	Součinitel efektivnosti žebra
F	m ²	Světlý průřez spalínového kanálu
h_h	m	Výška hořáků
h_o	m	Výška ohniště
h_z	mm	Výška žebra
i_{mo}	kJ·Nm ³	Entalpie spalín na výstupu z mříže
i_{nv}	kJ·kg ⁻¹	Entalpie napájecí vody
i_p	kJ·kg ⁻¹	Entalpie páry
I_{smin}	KJ·Nm ⁻³	Entalpie stechiometrických spalín
I_{vmin}	KJ·Nm ⁻³	Entalpie vlhkého vzduchu odpovídajícímu stech. množství
k	W·m ⁻² ·K ⁻¹	Součinitel prostupu tepla
$k \cdot p \cdot s$	-	Optická hustota spalín
k_s	-	Součinitel zeslabení sálání
k_{sz}	-	Součinitel zeslabení sálání sazí
M	kg·kmol ⁻¹	Molová hmotnost
m_p	Nm ³ ·s ⁻¹	Množství paliva
M_{p1}	kg·s ⁻¹	Hmotnostní tok páry
M_{p2}	kg·s ⁻¹	Hmotnostní tok páry
M_{p3}	kg·s ⁻¹	Hmotnostní tok páry
M_{v23}, M_{v12}	kg·s ⁻¹	Hmotnostní tok vstříkované vody
n_{tr}	-	Počet trubek
n_{ξ}	-	Počet řad
n_z	-	Počet žeber na 1m
O	m	Obvod světlého průřezu kanálu
$O_{H_2O^S}$	Nm ³	Objem vodní páry ve stechiometrických spalínách
$O_{H_2O^{sp}}$	Nm ³	Množství vlhkosti z paliva
$O_{H_2O^V}$	Nm ³	Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu
O_{ssmin}	Nm ³	Objem suchých spalín
O_{SVmin}	Nm ³	Minimální objem vlhkých spalín
O_{VSmin}	Nm ³	Objem suchého vzduchu
O_{VVmin}	Nm ³	Objem vlhkého vzduchu

O_{svr}^a	Nm^3	Objem spalín s recirkulací
P	MW	Tepelný příkon paliva
p	MPa	Tlak
pp	Pa	Parciální tlak vodní páry
Pr	-	Prandtlův číslo
p_s	Pa	Parciální tlak tříatomových plynů
Q	kW, MW, W	Tepelný výkon přenesený výměníkem
Q_i^r	$MJ \cdot Nm^{-3}$	Výhřevnost paliva
Q_{ired}	$kJ \cdot m^{-3}$	Teplo uvolněné v ohništi
Q_v	MW	Tepelný výkon
q_v	$kW \cdot m^3$	Objemové zatížení ohniště
Q_{vz}	$kJ \cdot m^{-3}$	Teplo vzduchu
r	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná plynová konstanta
R_m	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Univerzální plynová konstanta
r_p	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná plynová konstanta páry
r_s	-	Objemový podíl tříatomových plynů
r_v	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná plynová konstanta vzduchu
s	m	Efektivní tloušťka sálové vrstvy
s_1	m	Příčná rozteč
s_2	m	Podélná rozteč
S_{sp}	m^2	Průtočný průřez spalín
S_{st}	m^2	Povrch stěn ohniště
t	$^{\circ}C$	Teplota
T	K	Termodynamická teplota
t	m, mm	Tloušťka stěny trubky
t_i	$^{\circ}C$	Teplota vstupních spalín/media
t_{vyp}	$^{\circ}C$	Teplota sytosti vodní páry
t_{np}	$^{\circ}C$	Teplota nechlazeného plamene
t_o	$^{\circ}C$	Teplota výstupních spalín/media
t_{ok}	$^{\circ}C$	Teplota na konci ohniště
t_r	$^{\circ}C$	Teplota rosného bodu
T_s	K	Střední teplota proudu spalín
$t_s^{\cdot}$	$^{\circ}C$	Teplota vstupujících spalín
$t_s^{``}$	$^{\circ}C$	Teplota vystupujících spalín
t_{st}	-	Střední teplota spalín
$t_v^{\cdot}$	$^{\circ}C$	Teplota vstupujícího vzduchu
$t_v^{``}$	$^{\circ}C$	Teplota vystupujícího vzduchu
t_z	$^{\circ}C$	Teplota povrchu nánosů na straně spalín
t_z	mm	Tloušťka žebra
T_z	K	Teplota povrchu nánosů na straně spalín
v	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem
V_o	m^3	Objem spalovací komory
w_{sp}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost spalín
w_p	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost páry
w_w	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost vody
w_{vz}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost vzduchu
x_i	Nm^3	Objem dílčí složky x v daném objemu

x_h	-	Poměrná výška
x_{pl}	-	Součinitel korekce plamene
z	-	Počet řad
Z_{CO}	%	Ztráta chemickým nedopalem
Z_k	%	Komínová ztráta
Z_{sv}	%	Ztráta sdílením tepla do okolí
α	-	Součinitel přebytku vzduchu
α_k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla konvekci
α_p	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla konvekci ze strany páry
α_c	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Celkový součinitel přestupu tepla
α_{sal}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla sáláním
α_{Sr}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Redukovaný součinitel přestupu tepla ze spalínové strany
β	-	Pomocný součinitel k výpočtu efektivnosti žebra
Δt	$^{\circ}C$	Střední logaritmický teplotní spád
Δt_m	$^{\circ}C$	Menší teplotní rozdíl pracovních medií ve výměníku
Δt_v	$^{\circ}C$	Větší teplotní rozdíl pracovních medií ve výměníku
ε	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Součinitel zanesení plochy
ζ	-	Součinitel využití
η_k	%, -	Tepelná účinnost kotle
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
λ_z	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Tepelná vodivost materiálu žebra
μ	-	Součinitel rozšíření žebra
π	-	Ludolfovo číslo
ρ_{SVmin}	$Kg \cdot Nm^{-3}$	Hustota stechiometrických spalín
σ_1	-	Poměrná příčná rozteč
σ_2	-	Poměrná podélná rozteč
φ	%	Relativní vlhkost
χ	-	Podíl vodní páry v suchém vzduchu
ψ	-	Součinitel tepelné efektivnosti
ψ_z	-	Koeficient nerovnoměrného rozložení α_k po povrchu žebra
ω	-	Součinitel omývání plochy

Seznam použitých zdrojů

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. Brno: Nakladatelství VUT, 1986. 200 s. ISBN 80-21404-26-4.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [3] HOLMGREN, Magnus. *X Steam version 2.6*. Excel Steam Tables.
- [4] MUSIL, L. Plyn ve vytápění (I). TZB-info [online]. 17.10.2002 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1163-plyn-ve-vytapeni-i>

Seznam obrázků

Graf 2.1 I-t diagram spalín	21
Graf 2.2 I-t diagram spalín s rec.	23
Obrázek 7.1 Schéma vstřiku V23	31
Obrázek 7.2 Schéma vstřiku V12	32
Obrázek 1. Rozvolněná mem. stěna.....	33
Obrázek 8.2 Teplotní spád.....	36
Obrázek 9.1 Teplotní spád.....	39
Obrázek 10.1 Náčrt přehříváku 3.....	40
Obrázek 10.2. Uspořádání trubek P3	40
Obrázek 10.3 Teplotní spád P3.....	44
Obrázek 10.4 Teplotní spád mem. stěna	46
Obrázek 11.1 Náčrt přehříváku 2.....	47
Obrázek 11.2 Uspořádání trubek P2	47
Obrázek 11.3 Teplotní spád P2.....	51
Obrázek 11.4 Teplotní spád mem. stěna	53
Obrázek 12.1 Náčrt přehříváku 1.....	54
Obrázek 12.2 Uspořádání trubek P1	54
Obrázek 12.3 Teplotní spád P1.....	58
Obrázek 12.4 Teplotní spád mem. stěna	60
Obrázek 13.1 Náčrt ekonomizéru 2	62
Obrázek 13.2 Uspořádání trubek EKOII.....	62
Obrázek 13.3 Teplotní spád EKOII	66
Obrázek 13.4 Teplotní spád mem. stěna	68
Obrázek 14.1 Náčrt Ekonomizéru 1.....	69
Obrázek 15.1 Náčrt LUVU	74
Obrázek 15.2 Uspořádání trubek LUVU	74
Obrázek 15.3 Křížové proudění schéma	78
Obrázek 15.4 Teplotní spád.....	79

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Složení zemního plynu.....	17
Tabulka 2.2 fyzikální vlastnosti vzduchu.....	17
Tabulka 2.3 Hustota plynů	19
Tabulka 2.4 Měrná entalpie složek spalín	20
Tabulka 2.5 I-t tabulka spalín.....	20
Tabulka 2.6 Složky spalín s recirkulací	22
Tabulka 2.7 Entalpie spalín s rec.....	22
Tabulka 7.1 Parametry pracovního média.....	31
Tabulka 8.1 Geometri mříže.....	33
Tabulka 10.1 Parametry přehříváku P3	40
Tabulka 11.1 Parametry přehříváku P2.....	47
Tabulka 13.1 Parametry Ekonomizéru II	62
Tabulka 14.1 Parametry Ekonomizéru I	69
Tabulka 15.1 Parametry pro LUVO.....	74
Tabulka 16.1 Výkon na straně média.....	80
Tabulka 16.2 Výkon odevzdaný plochám.....	80

Seznam příloh

Příloha 1: Výkres kotle